



Estudi del comportament fluidodinàmic d'una bomba d'engranatges interns tipus Gerotor

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria

Industrial i Aeronàutica

de Terrassa

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

ENGINYERIA INDUSTRIAL

-MEMORIA-

Autor: David Piñero Méndez

Tutor: Pedro Javier Gàmez Montero

Co-Tutora: Mercedes Garcia Vílchez

Juny 2014

Sumari

1.	Agraïments.....	8
2.	Introducció	9
3.	Objecte.....	12
4.	Justificació	13
5.	Abast.....	14
6.	Estat de l'art	15
6.1.	Estudis CFD.....	15
6.2.	Geometria de la bomba.....	18
6.3.	Mètodes experimentals	19
7.	Bomba d'engranatges interns tipus gerotor	20
7.1.	Característiques de la bomba a estudiar	28
7.2.	Característiques del mallat.....	28
8.	Anàlisi fluidodinàmic.....	35
8.1.	Base de la simulació	36
8.2.	Mètodes de càlcul de la distància.....	41
8.2.1.	Comparació dels Threads	43
8.2.2.	Comparació dels centroides.....	45
8.2.3.	Cerca de les cares laterals de les cel·les	48
8.2.4.	Radi de la corba de punts de contacte	50
8.2.5.	Radi de la corba de la dent	53
9.	Simulació	56
9.1.	Preparació de la simulació	56
9.2.	Resultats obtinguts.....	57
9.3.	Discussió dels resultats.....	61
10.	Nou disseny d'una bomba de metacrilat	64
11.	Mallat del nou disseny.....	70
12.	Medi ambient.....	78
13.	Treballs futurs	80



14.	Conclusions	81
15.	Planning	83
16.	Nomenclatura.....	85
17.	Bibliografia	87
18.	Plec de condicions	88
19.	Pressupost	89

Llista de figures

Figura 6.1 Mallat	16
Figura 6.2 Comparació dels resultats	17
Figura 7.1 Bomba gerotor	20
Figura 7.2 Esquema engranatges i lumbreres	20
Figura 7.3 Esquema amb les cambres de volums màxim i mínim	21
Figura 7.4 Instant 1	22
Figura 7.5 Instant 2	22
Figura 7.7 Instant 4	23
Figura 7.8 Instant 5	24
Figura 7.9 Instant 6	24
Figura 7.10 Instant 7	25
Figura 7.11 Instant 8	25
Figura 7.12 Esquema dels engranatges i línia de contacte	26
Figura 7.13 Engranatges i línia de contacte.....	27
Figura 7.14 Esquema generació del perfil de l'engranatge exterior	27
Figura 7.15 Cel·la tipus del mallat.....	29
Figura 7.17 Capes del mallat	30
Figura 7.18 Mallat sencer	30
Figura 7.19 Mallat d'entrada	31
Figura 7.20 Mallat lumbrera superior d'entrada	31
Figura 7.21 Mallat lumbrera principal d'entrada	32
Figura 7.23 Mallat de la cavitat de lubricació lateral	33
Figura 7.24 Detall al mallat de la cavitat de lubricació lateral	33
Figura 7.25 Mallat de la separació entre engranatges i base	34
Figura 7.26 Detall al mallat de la separació entre engranatges i base.....	34
Figura 8.1 Imatge del mallat amb detall a la zona del punt de contacte ..	36
Figura 8.2 Viscositat del fluid amb <i>Gearing contact point</i>	38

Figura 8.3 Pseudocodi mètode <i>Gearing contact point</i>	39
Figura 8.4 En groc distància entre perfils.....	41
Figura 8.5 Cel·la deformada	42
Figura 8.6 Distribució carrega de temps	43
Figura 8.7 Pseudocodi mètode 1	44
Figura 8.8 Esquema funcionament funcions F_{C0} i F_{C1}	45
Figura 8.9 Exemple centroide d'un triangle.....	46
Figura 8.10 Pseudocodi mètode 2	47
Figura 8.11 Pseudocodi mètode 3	49
Figura 8.13 Detall punt m.....	52
Figura 8.14 Detall mallat punt equivalent a m.....	52
Figura 8.15 Cel·les amb tots els nodes per sobre o sota del radi de punt de contacte	53
Figura 8.16 Detall cel·les amb radi S	54
Figura 8.17 Pseudocodi mètode 5	55
Figura 9.1 Configuració del <i>solver</i>	56
Figura 9.2 Pressió al fluid entre engranatge	57
Figura 9.3 Velocitats de tot el fluid.....	58
Figura 9.4 Velocitats del fluid entre engranatges.....	58
Figura 9.5 Viscositat del fluid	59
Figura 9.6 Helicity del fluid entre engranatges.....	59
Figura 9.7 Reynolds.....	60
Figura 9.8 Reynolds fluid entre engranatges	60
Figura 9.9 Comparació dels fluxos.....	61
Figura 9.10 Detall d'un cicle.....	61
Figura 9.11 Comparació punts de contacte	62
Figura 9.12 Distància mínima	63
Figura 10.1 Dibuix del nou disseny.....	64
Figura 10.2 Explosió de les peces	64

Figura 10.3 Carcassa de la bomba	65
Figura 10.4 coberta.....	65
Figura 10.5 Coberta exterior	66
Figura 10.6 Eix.....	66
Figura 10.7 Engranatge exterior	67
Figura 10.8 Engranatge interior	67
Figura 10.9 Connexió lateral.....	68
Figura 10.10 Pla de connexió	69
Figura 11.1 Negatiu de la bomba.....	70
Figura 11.2 Negatiu final de la bomba	71
Figura 11.3 Mallat	71
Figura 11.4 Cel·la tipus.....	72
Figura 11.5 Malla del tub d'entrada.....	72
Figura 11.6 Mallat de les lumbreres.....	73
Figura 11.7 Detall zona superior lumbrera de sortida	73
Figura 11.8 Mallat de la cavitat	74
Figura 11.9 Pressió.....	74
Figura 11.10 Detall pressió	75
Figura 11.11 Tall pla axial dels tubs pressió	75
Figura 11.12 Mòdul de la velocitat	75
Figura 11.13 Tres camins del fluid.....	76
Figura 11.14 Tall pel pla axial dels tubs velocitat.....	76
Figura 11.15 Nombre de Reynolds	76
Figura 11.16 Nombre de Reynolds	77
Figura 13.1 Pseudocodi futura UDF.....	80
Figura 15.1 Diagrama de Gantt.....	84



Llista de taules

Taula 7.1 Paràmetres geomètrics de la bomba estudiada.....	28
Taula 7.2 Paràmetres de la simulació.....	28
Taula 9.1 Propietats de la simulació	57
Taula 15.1 Planning	83
Taula 15.2 Dates de les tasques.....	83
Taula 19.1 Cost de les tasques.....	89
Taula 19.2 Cost de les simulacions	90



1. Agraïments

Primer de tot m'agradaria agrair al Departament de Mecànica de Fluids de la UPC de Terrassa per facilitar-me les instal·lacions per poder realitzar les simulacions així com el software utilitzat.

Especialment a Pedro Javier Gàmez i Mercedes Garcia per guiar-me, ajudar-me en tot el necessari i resoldre'm els dubtes que han sorgit durant aquest quadrimestre. Sobretot per la seva paciència amb mi i la seva entrega.

També a la meva família, amics i companys que m'han recolzat i hagut de suportar durant tot aquest temps.

2. Introducció

L'aparició de les bombes hidràuliques es remunta al segle III a.C. amb el cargol d'Arquímedes, un mecanisme que permetia elevar fluids o sòlids de petites dimensions. Des de llavors han aparegut una gran varietat de bombes hidràuliques com les d'engranatges interns que utilitzen engranatges per desplaçar els fluids.

En el cas de les bombes d'engranatges interns la seva utilització ha anat augmentant amb el pas dels anys degut a la seva potència i la capacitat de ser molt compactes amb un cost reduït. Les seves aplicacions són molt variades sobretot a la indústria o en vehicles automòbils, per exemple en sistemes de lubricació d'un motor de combustió interna.

Un dels molts tipus de bombes d'engranatges interns són les bombes tipus gerotor que és el tipus de bomba que s'estudia en aquest estudi.

Amb els avanços a nivell computacional que s'han assolit en els últims anys s'està donant la possibilitat de realitzar estudis més complexos ja que les eines de que es disposen ara són més potents. Fa menys de mig segle que s'utilitza el CFD, Computational Fluid Dynamics, mecànica de fluid computacional, i el seu ús no fa més que créixer gracies a les seves infinites possibilitats.

El CFD utilitza mètodes numèrics i algorismes per resoldre i analitzar problemes sobre el flux de substàncies. Es un requisit fonamental discretitzar el fluid mitjançant un mallat. El tipus de mallat, estructurat i no estructurat, és molt important de cara a obtenir uns resultats satisfactoris.

Per realitzar aquests anàlisis cal un software que en aquest cas ha estat ANSYS Fluent donada la facilitat de treball que permet i que la universitat disposa d'una llicència d'estudiants amb la que es pot treballar. A part el departament de Mecànica de fluids ha ofert un ordinador més potent que els que es troben a les sales informàtiques de l'escola per agilitzar el càlcul de la simulació.

Fluent requereix d'un subprograma que s'ha de desenvolupar per l'usuari que realitza certes modificacions necessàries per la simulació. Aquest subprograma es coneix com UDF¹ i el seu llenguatge de programació està basat en C. Tot i que el mateix Fluent ofereix una guia exhaustiva sobre les UDF no hi ha cap base o codi UDF ja desenvolupat per ANSYS Fluent que es pugui agafar com a

¹ UDF: User-Defined Function, veure apartat 8 per més detalls.

referència a l'hora de crear el subprograma, per tant, l'usuari es troba davant un repte.

Aquest projecte es basa en una línia d'investigació del departament de mecànica de fluids de l'ETSEIAT. Durant tots els estudis que s'han desenvolupat ja es van programar UDFs, en una primera instància es va començar amb un codi que permetia utilitzar el mètode *wall-cell strategy* desenvolupat per P J Gamez Montero i el següent pas va ser realitzat per Mercedes Garcia amb el mètode *gearing contact point strategy*. Aquest nou sistema va implicar una reducció important del temps de càlcul necessària entre altres aspectes.

Ara s'ha tornat a avançar amb un nou mètode que permetrà aconseguir una millora considerable aconseguint una simulació més realista del comportament fluidodinàmic de la bomba.

La millora que s'introdueix a la UDF és el càlcul de la distància entre les dents dels engranatges de la bomba per poder trobar el punt de contacte que hi ha entre elles.

Fins ara aquesta distància s'aproximava a la distància que hi ha entre una cel·la i el punt teòric de contacte, que no considera toleràncies de fabricació, però aquest sistema pot determinar que el punt de contacte de la simulació es troba en un altre lloc, no molt llunyà, que el punt on els engranatges són més propers, que és el punt de contacte real.

Amb aquest punt trobat s'espera poder modelitzar el moviment dels engranatges de forma més acurada a la realitat. Això es podrà dur a terme gràcies al fet que la UDF buscarà a quina dent es produeix el major contacte, menor distància, i realitzarà un moviment rotatori amb centre en aquest punt en el següent instant de temps, repetint-se aquest procés fins acabar la simulació.

A més també es proposa un nou disseny d'una bomba gerotor de la qual s'han realitzat els plànols pertinents. Aquesta nova bomba s'utilitzarà en el futur per realitzar estudis experimentals. A partir del nou disseny realitzat en CATIA v5 s'ha realitzat un mallat que permeti millorar les futures simulacions i que sigui compatible amb la nova UDF.

Un altre cop els motius d'utilització d'un software, CATIA en aquest cas, han estat la facilitat d'ús i coneixements previs i la disponibilitat de llicència comercial a l'escola. CATIA és un programa de disseny CAD en 3D comunament utilitzat.

També es realitza un mallat i una simulació del nou disseny realitzat prèviament amb el software comercial ICEM CFD 14.5. Aquest nou mallat vol establir les

bases per un mallat molt més complex. Els motius d'utilització d'aquest software tornen a ser els mateixos, disponibilitat de llicència comercial a l'escola i els coneixements previs.

A nivell personal l'interès i la motivació en aquest projecte han sorgit de la matèria que es tracta en ell i de la possibilitat d'aprendre de manera més profunda sobre les simulacions CFD i els softwares que utilitzen. A més a més el fet de col·laborar amb el departament de mecànica de fluids i poder ser partícip de la seva línia d'investigació és una raó de pes.

3. Objecte

El projecte es centra principalment en l'obtenció d'una UDF² que permeti trobar a partir de la distància entre les dents dels engranatges els punts de contacte entre ells. Aquest punts de contacte són els punts on es produeix un contacte físic entre els dos engranatges, en concret es produeixen tants com dents té l'engranatge exterior.

Aquesta UDF no només trobarà el punt de contacte si no que modificarà la viscositat de la mateixa forma que es realitza en la UDF proporcionada però a partir del nou punt de contacte. Amb la modificació de la viscositat s'aconsegueix simular el contacte sòlid-sòlid entre les dents dels engranatges intern i extern.

Per fer-ho es programarà una UDF utilitzant com a base i aprofitant els aspectes convenients del codi actual que opera amb el mètode *gearing contact point strategy*.

Es presentarà un nou disseny de bomba gerotor per tal de fabricar-la i comprovar experimentalment amb un nou mallat del mateix disseny que compleixi amb els requeriments de la UDF.

² UDF: User-Defined Function, veure apartat 8 per més detalls.

4. Justificació

En els últims anys la utilització així com la importància de les bombes gerotor ha crescut considerablement i les aplicacions s'han expandit en una gran varietat com per exemple l'automoció o indústria agrícola.

En l'actualitat existeix una línia d'investigació en el departament de mecànica de fluids sobre les bombes gerotor i es dona l'ocasió de continuar amb la recerca.

En els treballs actuals es busca i assigna el punt de contacte amb un mètode que pot no ser del tot precís això pot portar a que els resultats de les simulacions difereixin de la realitat.

Amb la nova UDF³ s'obre la porta cap a una UDF final que permetrà obtenir millors resultats gràcies al fet d'aproximar d'una manera més precisa com es comporten els engranatges d'una bomba gerotor realment.

Tenint millors simulacions es podran desenvolupar diferents millores en l'estructura de les bombes que incrementarien el seu rendiment. Per exemple es reduirien els esforços necessaris per determinar si un nou sistema d'entrada millora el rendiment o no.

Tant l'escola com el departament tenen disponibles llicències de ANSYS Fluent que permeten realitzar les simulacions CFD satisfactòriament.

³ UDF: User-Defined Function, veure apartat 8 per més detalls.

5. Abast

Durant el projecte es desenvoluparà una UDF⁴ que realitzarà les següents funcions:

- Càlcul del punt de contacte teòric.
- Càlcul de la distància entre les dents dels engranatges per un grup de cel·les.
- Determinació de la distància mínima entre les dents.
- Modificació de la viscositat per les cel·les amb la distància calculada per la simulació del contacte sòlid-sòlid entre les dents.

No es donarà la capacitat de desplaçar els centres de gravetat dels engranatges a la UDF.

També es durà a terme una simulació CFD amb el codi ANSYS Fluent que confirmarà el correcte funcionament de la UDF. Per verificar els resultats es comparà el cabal de sortida amb el de les simulacions prèvies realitzades al departament que ja han estat comprovades.

Es desenvoluparà un nou disseny CAD 3D de la bomba i s'elaborarà una malla del mateix que complirà amb els requeriments de la UDF. Per fer-ho s'utilitzaran els softwares CATIA v5 i ICEM CFD 14.5, en ambdós casos es disposa de llicències a les instal·lacions informàtiques de l'escola.

No es realitzaran simulacions amb altres codis o softwares ni altres tipus de sistemes de simulació que no sigui CFD.

Tampoc es realitzarà el disseny CAD en altres programes ni s'utilitzarà un altres software per realitzar la malla.

⁴ UDF: User-Defined Function, veure apartat 8 per més detalls.

6. Estat de l'art

6.1. Estudis CFD

Amb l'augment de la utilització d'aquest tipus de bombes també es va incrementar la necessitat de comprendre el comportament de la bomba i com es pot millorar la seva eficiència. Tot i això fins als últims anys no s'ha pogut començar a estudiar detalladament el comportament fluidodinàmic de les bombes tipus gerotor per la dificultat que implica aquest càlcul que requereix de gran potència de processament de dades.

Més concretament fins a 1997 no va aparèixer un estudi d'un model CFD transitori 3D que a més a més incloïa un model amb cavitació. Aquest estudi va ser realitzat per Jiang i Peng que van confirmar les prediccions de pèrdues per cavitació en la bomba.

En els anys successius van aparèixer diferents estudis de models CFD on s'estudiava la desviació de la coberta degut al gradient de pressions, els efectes sobre el flux de la pressió d'entrada, les ones de pressió o la geometria de les entrades i sortides i un estudi d'una bomba de mitja lluna.

Un d'aquest estudis es va realitzar per la falta d'investigació sobre els motors de tipus gerotor. Els autors, H. Ding, X. J. Lu i B. Jiang [1], van realitzar un estudi d'un model CFD d'un motor orbital.

Una característica molt importat del motor estudiat és que el gir de l'engranatge exterior està restringit fent que les cambres on queda el fluid siguin estàtiques cosa que no passa si l'engranatge exterior gira. També cal destacar que el moviment de l'engranatge interior es pot separar en dos moviments diferents, una rotació sobre el seu centre i una translació al voltant del centre de l'engranatge extern.

Un problema amb el que es van trobar els autors d'aquest estudi així com dels altres es la dificultat de mallar ja que aquest tipus de mecanisme de desplaçament positiu té zones on la separació entre els elements pot arribar a ser de micres. Aquestes zones tenen molta importància en el comportament i l'eficiència del mecanisme i un disseny incorrecte pot ser la causa d'una gran quantitat de problemes, com per exemple, una predicció incorrecta del cabal instantani proporcionat per la bomba.

La solució per la que van optar els autors va ser utilitzar una malla amb moviment i lliscament. Topològicament el volum del rotor és similar a un anell i per tant és senzill mallar la zona que posteriorment es pot adaptar a la geometria

del gerotor. En realitzar el moviment de rototraslació la malla va lliscant sobre la geometria adaptant les dimensions de la malla.

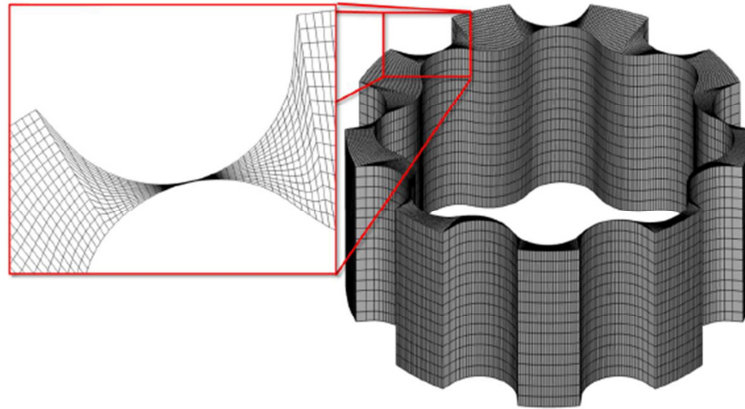


Figura 6.1 Mallat

D'aquesta manera s'aconsegueix una malla d'unes característiques més adequades alhora de realitzar una simulació.

En l'estudi es van resoldre les equacions de conservació de la massa i moment fent servir una aproximació als volums finits. Segons l'estat del fluid es van realitzar modificacions a les equacions per tal d'apropar-se al comportament real en flux turbulent o amb cavitació.

Un cop extrets els resultats de la simulació es va fer patent que es repeteix un patró. Visualitzant la pressió en una cambra en concret i el flux de massa en funció de l'angle girat es pot veure que cada 45 graus es tornen a repetir els resultats. Això indica que tan sols cal simular entre 90 i 135 graus per obtenir uns resultats acceptables en les condicions de l'estudi.

En l'estudi es van comparar els resultats obtinguts amb les dades extretes de proves experimentals proporcionades pel fabricant. Tan sols es van poder observar discrepàncies en el parell, però cal destacar que en la simulació no es tenen en compte les pèrdues mecàniques com per exemple la fricció entre el elements.

Un estudi més proper al projecte és el realitzat per P.J. Gamez-Montero [2] on es caracteritza el flux en una bomba trocoidal mitjançant gràfiques de bond i mesures experimentals. Aquest estudi es va realitzar amb l'objectiu de unificar en una sola investigació tres temes que ja s'havien estudiat prèviament per una varietat d'autors, la geometria i cinemàtica, modelat i simulació i mesures experimentals.

Els gràfics de bond són una tècnica gràfica explícita utilitzada per representar sistemes físics. La seva aparició va ser a l'any 1959 i van ser creats per H.M. Paynter. Des de llavors s'han millorat amb el pas del temps. Els gràfics de bond modelitzen les interaccions entre diferents tipus de sistemes físics, com per exemple sistemes elèctrics o hidràulics. Això és possible gràcies a un punt comú entre ells, la potència. La potència pot fluir des de un component a un altre.

Un altre avantatge dels gràfics de bond és la capacitat d'afegir complexitat progressivament. Per fer-ho s'afegeixen nous elements pas a pas. És possible començar amb una modelització molt simple de la realitat i gradualment completar-la fins arribar a la precisió desitjada.

Prèviament a la comparació dels resultats es planteja el sistema de mesura experimental. Aquest sistema ja ha sigut utilitzat en considerables ocasions i va ser desenvolupat per Edge, Tilley i Johnston de l'escola d'enginyeria mecànica de la universitat de Bath. Amb aquest sistema s'aconsegueixen uns resultats excel·lents sempre que es realitzi adequadament.

Respecte a la comparació dels resultats queda molt clar una clara diferència entre la simulació i les mesures experimentals en el flux instantani en repetides ocasions. Aquests pics poden estar deguts a l'entrada de fluid en la cambra just quant el punt de contacte es separa i la cambra queda oberta a la zona de sortida, provocant els pics positius.

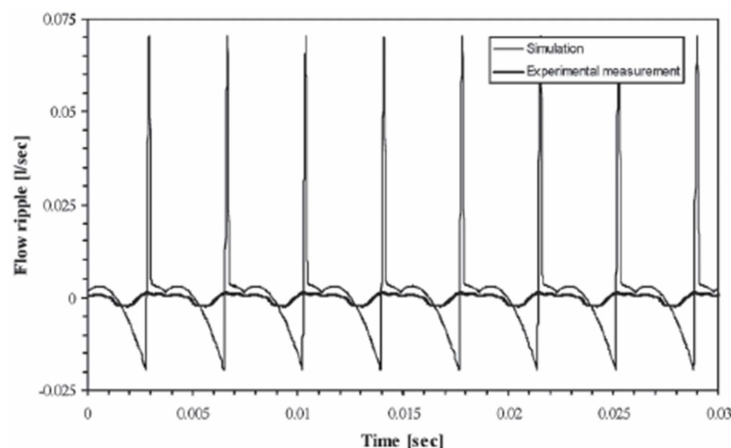


Figura 6.2 Comparació dels resultats

I els pics negatius estarien provocats per la mateixa raó però ara en la zona d'entrada.

A més a més es torna a repetir un discrepància entre la simulació i les mesures experimentals tal i com succeïa en altres estudis degut a no considerar en la simulació les possibles pèrdues durant l'experiment.

Prèviament a aquest estudi el mateix autor va realitzar un altre sobre el problema de contacte en les bombes trocoïdals. Concretament es va estudiar la influència del contacte en l'engranatge i la magnitud del mateix.

Un altre estudi que s'endinsa en el contacte entre els engranatges va ser realitzat per Giovanni Bonandrini [4] de la universitat de Pavia. Durant l'estudi es dissenya un nou perfil que mostra avantatges respecte als perfils actuals. A més a més s'estudia el sistema de contacte amb un anàlisi de contacte dels dents mostrant errors de transmissió en la rotació de la bomba, admissibles considerant les toleràncies aplicades a la fabricació. Les correccions aplicades al perfil del dent permeten evitar per complert problemes provocats per interferències o penetració de dent.

Aquests no han estat els únics estudis on s'ha investigat l'efecte del contacte entre les dents dels engranatges. Lozica Ivanovic, Danica Josifovic i Andreja Ili [5] van realitzar un estudi modelitzant una bomba gerotor. Prèviament van definir les equacions per els perfils de dent i les forces i parells que actuen en els engranatges.

Els resultats de la investigació sobre bombes que treballen a les mateixes condicions de volum i número de dents indica que sofreixen més tensió de contacte quan el valor del coeficient trocoïdal és major. Aquest coeficient és una relació entre el radi trocoïdal i el radi del cercle de moviment.

6.2. Geometria de la bomba

A l'article *Contact problems of a trochoidal-gear pump* de Gamez-Montero et al. (2006) es tracta i s'explica els principals paràmetres de la geometria de la bomba, en concret dels engranatges. Comprendre el disseny del mecanisme és fonamental en un estudi CFD i més encara quan s'ha de realitzar una malla amb unes propietats especials.

Així doncs en l'article es profunditza en la generació dels perfils dels engranatges i en les corbes que els caracteritzen que permeten trobar els punts de contacte teòrics fàcilment.

6.3. Mètodes experimentals

El present projecte compara els resultats obtinguts en una simulació enfront dels obtinguts en altres simulacions del mateix tipus que a la seva vegada han estat comparades amb els resultats obtinguts d'un anàlisi PIV. El Particle Image Velocimetry no és l'únic sistema que s'hauria pogut fer servir. Craig Snoeyink i Steven T. Wereley de la universitat de Purdue, Estats Units, van realitzar un estudi on es discutien els diferents sistemes recomanats.

El sistema més antic és el μ PIV, que fa servir un microscopi per obtenir una major precisió. Aquest sistema prové del PIV i tots dos comparteixen una limitació, són sistemes de dos dimensions. El PIV permet determinar els vectors de velocitat en diferents plans il·luminant amb làser només el desitjat. En canvi el μ PIV necessita desenfocar les partícules que queden fora del pla tal i com es faria amb una càmera de fotografies, però això pot provocar errors considerables.

Un altre problema que presenta el μ PIV que com el PIV requereix d'un determinat nombre de partícules per tal de que el software pugui determinar la velocitat i donades les dimensions dels dispositius en que s'utilitza no sempre és fàcil aconseguir-ho.

Vist aquests estudis queda clar que la literatura existent referent a l'estudi fluidodinàmic de les bombes gerotor no és molt extensa, però hi ha dos articles, l'estudi del motor gerotor i l'estudi d'una bomba gerotor amb gràfics de bond, que aporten molta informació sobre com avançar en el present projecte i simplifiquen certs aspectes, com per exemple la simplificació que van realitzar H. Ding, X. J. Lu i B. Jiang referent al estudi de només el gir de 135 graus.

Queda clar que no s'ha realitzat prèviament cap tipus d'estudi com el que es presenta en aquest projecte excepte els realitzats en la línia de recerca del departament de l'escola i que es pretén millorar.

7. Bomba d'engranatges interns tipus gerotor

Dins de l'ampli ventall de bombes hidràuliques de desplaçament volumètric positiu podem trobar les tipus gerotor. Aquestes bombes s'utilitzen extensament en els motors d'automoció per la lubrificació d'oli o bombeig de combustible.



Figura 7.1 Bomba gerotor

Els components més importants d'aquestes bombes són dos engranatges, un interior amb les dents externes i l'altre exterior amb les dents internes. Dins l'engranatge exterior es troba l'interior de tal forma que les seves dents tenen contacte amb les dents de l'altre formant cambres. Els punts on hi ha contacte entre les dents es diuen els punts de contacte i en total hi ha tants com dents tingui l'engranatge exterior. El numero de dents de l'engranatge exterior és Z mentre que el de l'interior és $Z - 1$.

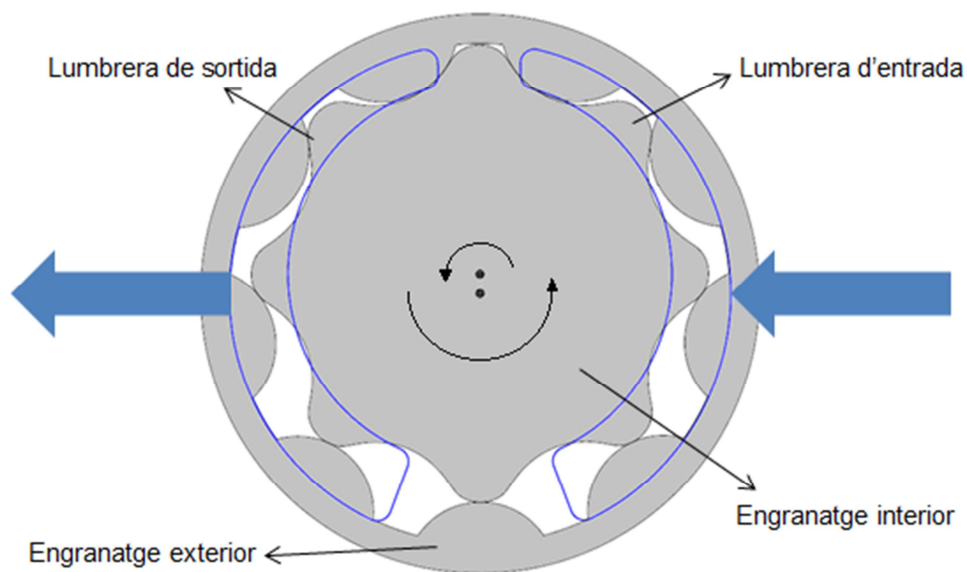


Figura 7.2 Esquema engranatges i lumbreres

D'aquesta forma s'aconsegueix crear Z cambres que van variant el seu volum amb el moviment dels engranatges.

La bomba també està formada per unes lumbreres d'entrada i sortida que es troben en el pla superior dels engranatges que es poden veure en la figura 7.2 presentades de color blau. Aquestes dues lumbreres estan comunicades amb l'entrada i sortida de la bomba.

Per un instant de temps hi ha dos cambres que queden sense comunicació directa amb les lumbreres d'entrada i sortida, són les cambres de volum màxim i mínim.

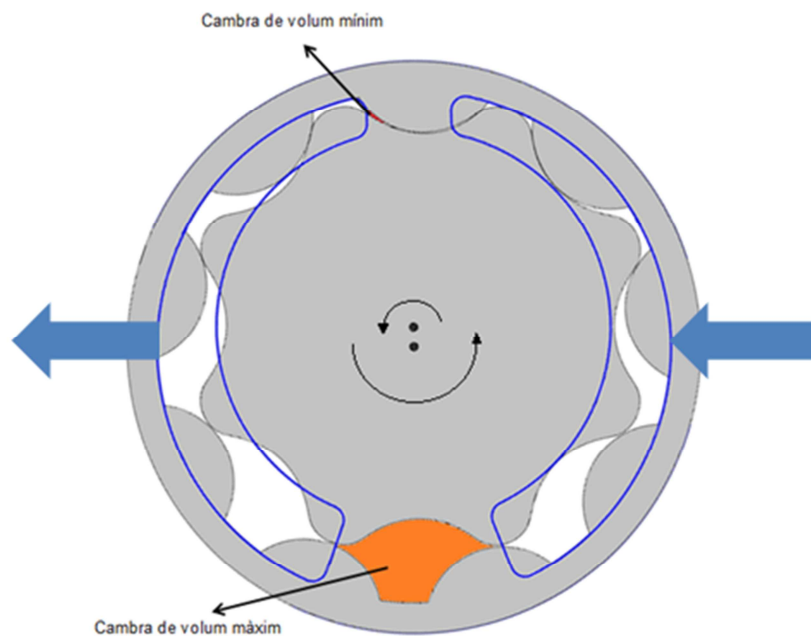


Figura 7.3 Esquema amb les cambres de volums màxim i mínim

El funcionament d'aquestes bombes és molt simple, la rotació dels engranatges fa que el volum de la cambra de volum mínim creixi de tal forma que es crea una depressió que absorbeix el fluid cap a la cambra i per tant dins la bomba. A la vegada la cambra de volum màxim disminueix impulsant el fluid fora a través de la lumbrera de sortida. Així doncs amb la rotació dels dos engranatges es bomba el fluid.

En la següent seqüència d'imatges es pot visualitzar com és el moviment de la bomba durant una volta de l'engranatge exterior i com evoluciona una cambra, concretament la cambra de volum mínim en l'estat inicial.

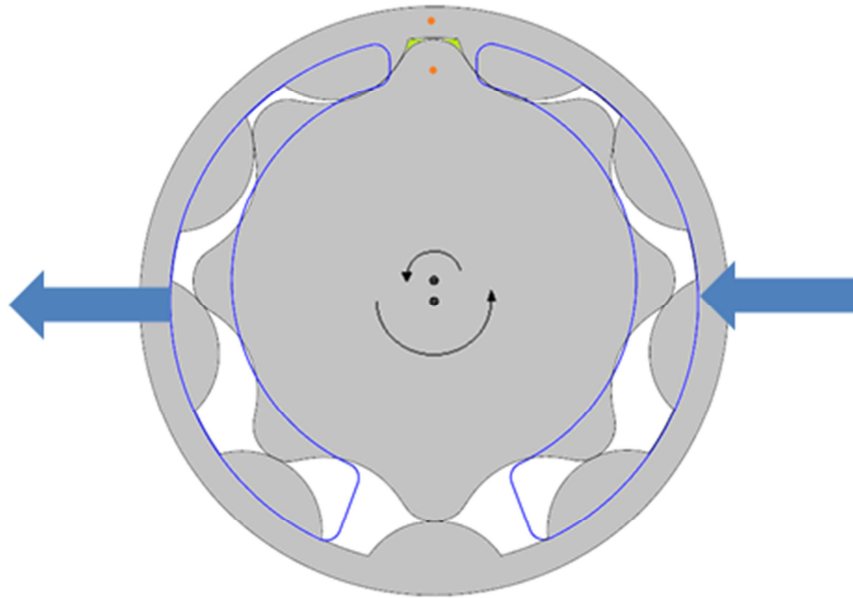


Figura 7.4 Instant 1

La cambra, de color verd en la imatge superior, comença amb un volum mínim i completament aïllada de les lumbreres d'entrada i sortida.

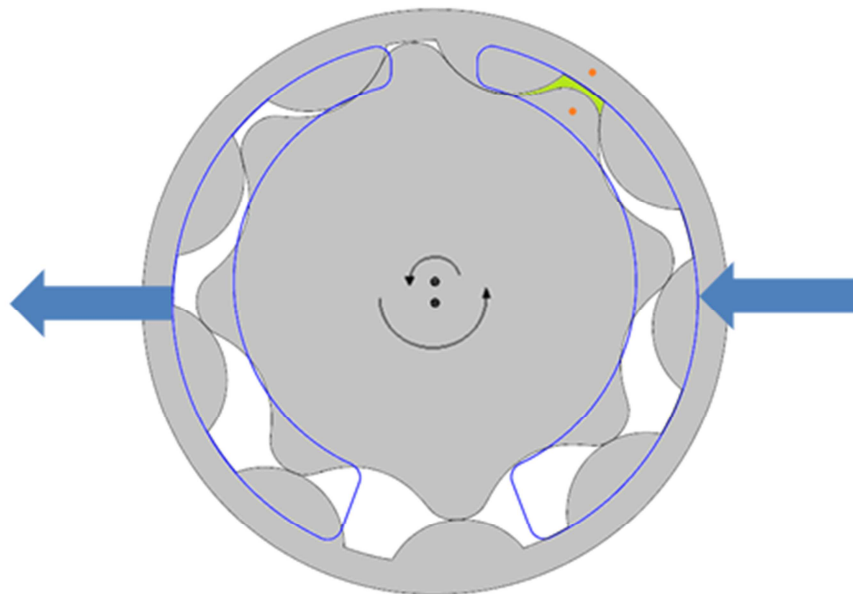


Figura 7.5 Instant 2

Amb la rotació dels engranatges s'augmenta el volum de la cambra que crea un buit i absorbeix el fluid cap a dins seu de la lumbrera d'entrada.

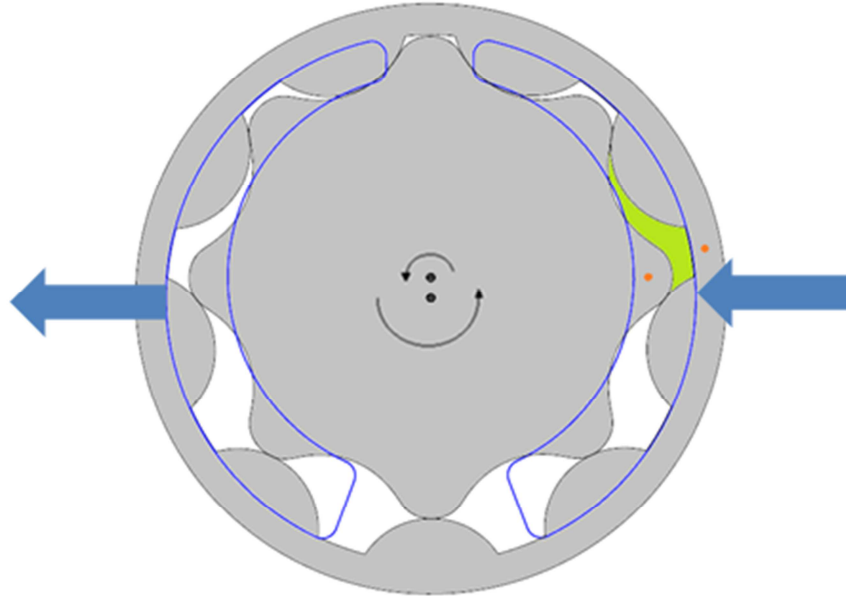


Figura 7.6 Instant 3

La cambra continua augmenta el seu volum fins arribar al final de la connexió amb la lumbrera d'entrada on s'assoleix el volum màxim.

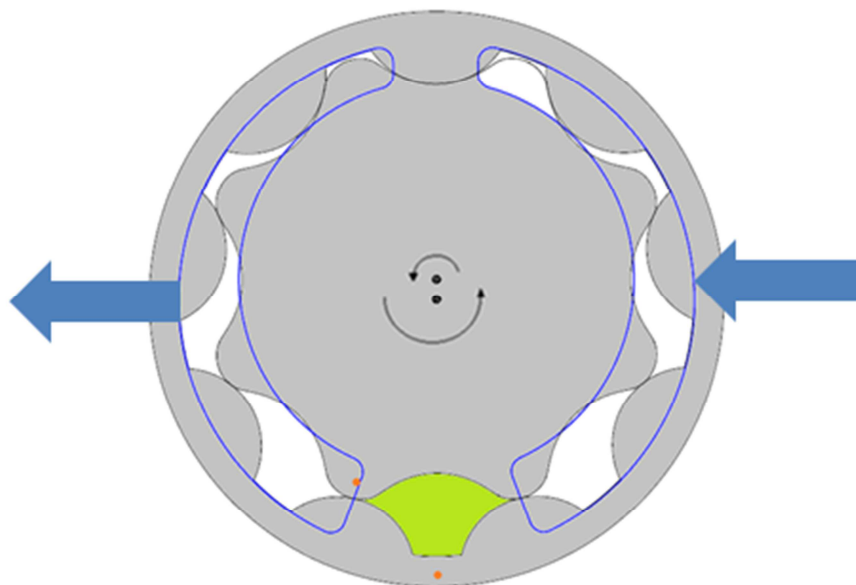


Figura 7.7 Instant 4

En l'instant que s'assoleix el volum màxim la cambra està aïllada de les lumbreres d'entrada i sortida impedit que en qualsevol instant hi hagi una connexió directa entre l'entrada i la sortida.

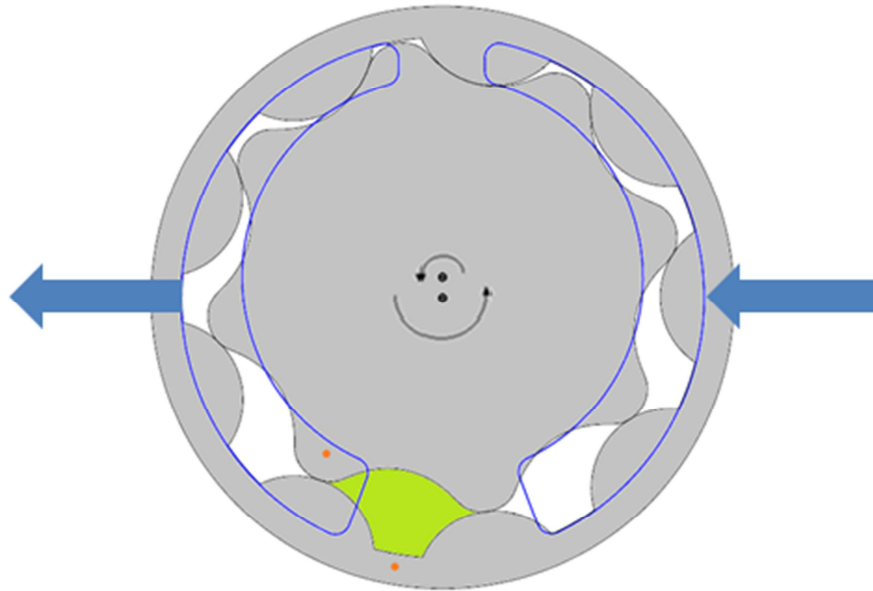


Figura 7.8 Instant 5

Un cop es produeix la connexió amb la lumbrera de sortida es comença a reduir el volum de la cambra forçant al fluid a sortir.

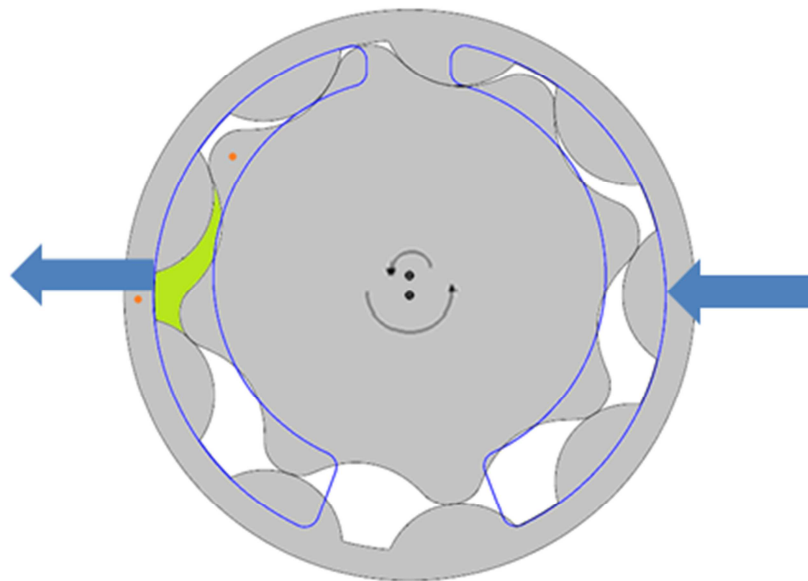


Figura 7.9 Instant 6

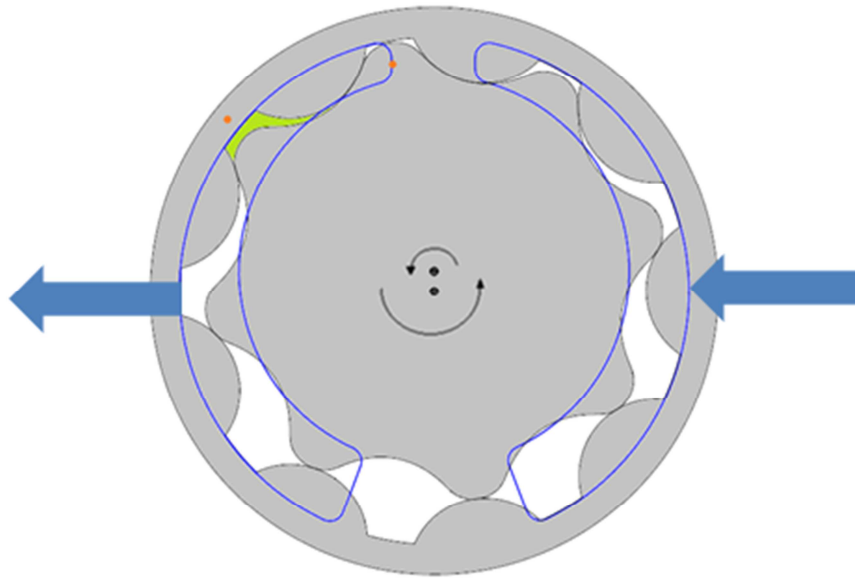


Figura 7.10 Instant 7

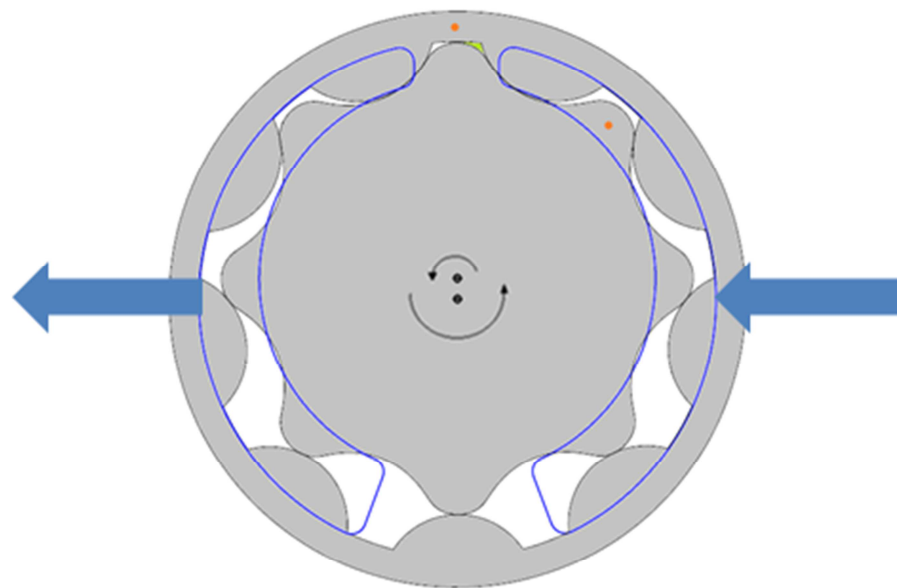


Figura 7.11 Instant 8

Quan s'ha efectuat una volta completa de l'engranatge exterior l'interior s'ha desfasat una dent respecte l'altre, tal i com es pot observar en la seqüència d'imatges.

Com es veurà més endavant els punts de contacte són de vital importància i conèixer les seves posicions teòriques és essencial pel mètode de simulació. De l'article *Contact problems of a trochoidal-gear pump* de P.J. Gamez-Montero et al. [3] s'extreuen les equacions de la corba que formen els punts de contacte:

$$x_{pc}(\alpha_{pc}) = R_2 \cdot \cos(\alpha_{pc}) - \frac{S}{m} \cdot (R_2 \cdot \cos(\alpha_{pc}) \pm r_2) \quad (7.1)$$

$$y_{pc}(\alpha_{pc}) = R_2 \cdot \sin(\alpha_{pc}) - \frac{S}{m} \cdot R_2 \cdot \sin(\alpha_{pc}) \quad (7.2)$$

$$m = \sqrt{r_2^2 + R_2^2 \pm 2 \cdot r_2 \cdot R_2 \cdot \cos(\alpha_{pc})} \quad (7.3)$$

$$\alpha_{pc} = j \cdot \gamma + \omega_{ext} \cdot t \quad (7.4)$$

En la següent imatge es pot veure un esquema dels engranatges amb la corba de punts de contacte, *line of contact*, dibuixada.

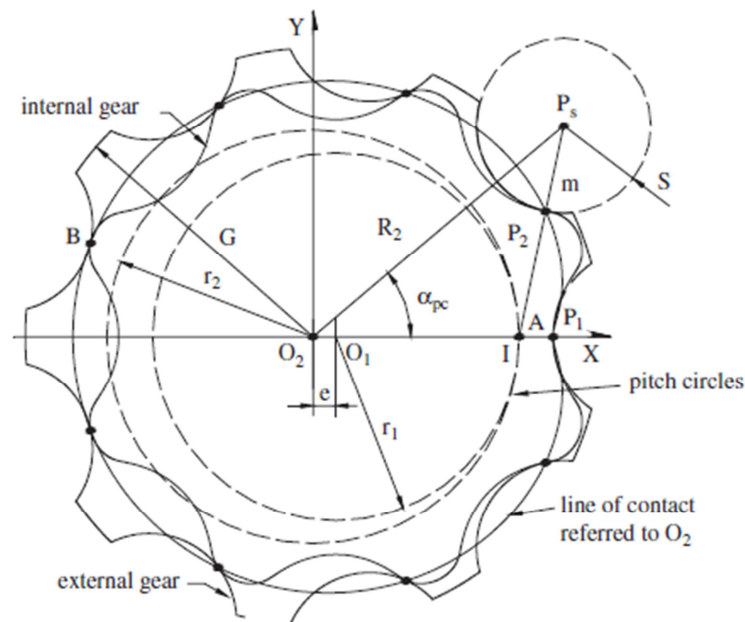


Figura 7.12 Esquema dels engranatges i línia de contacte

En la figura 7.12 és difícil d'apreciar però en la següent figura es pot veure que la línia de punts de contacte no és una circumferència amb centre a O_2 completament ja que en la zona on es troba P_1 , zona dreta de la imatge, es produeix una mossegada.

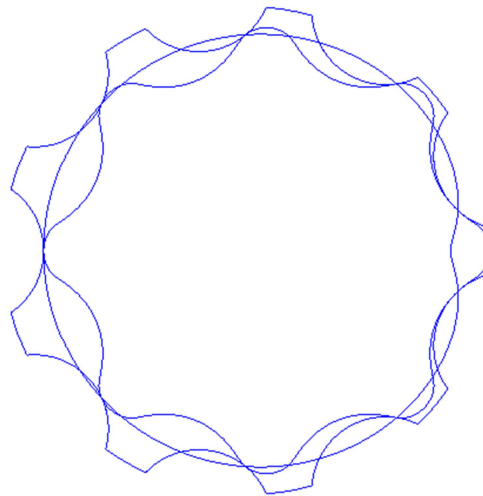


Figura 7.13 Engranatges i línia de contacte

Aquest fet és molt important per motius que es veuran més endavant.

Un altre aspecte important sobre la geometria dels engranatges és una eina que s'utilitza per trobar el punt de contacte real. Per generar el perfil de l'engranatge exterior s'utilitzen arcs de radi S distribuïts equidistants sobre una circumferència de radi R_2 centrada a O_2 tal i com es pot observar en la següent imatge.

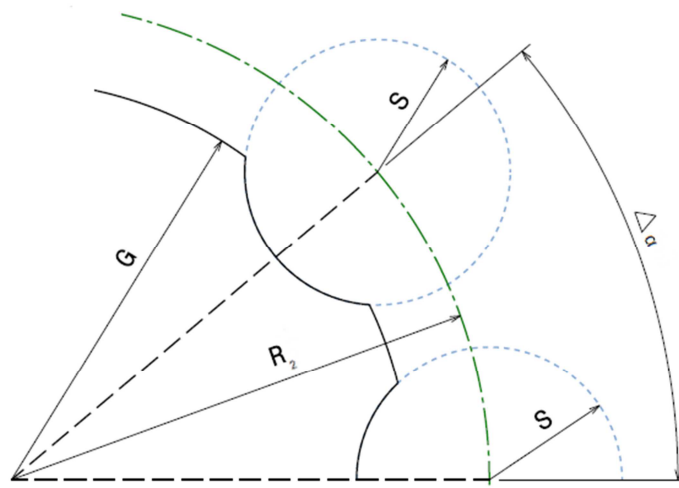


Figura 7.14 Esquema generació del perfil de l'engranatge exterior

Cada corba forma una dent fins que es creua amb la circumferència de radi G que tanca el perfil de l'engranatge exterior.

7.1. Característiques de la bomba a estudiar

Com ja s'ha vist hi ha certs paràmetres únics de cada la bomba, a continuació es presenten els de la bomba estudiada.

Taula 7.1 Paràmetres geomètrics de la bomba estudiada

Paràmetres	
e	2.85 mm
S	10.85 mm
G	35.8 mm
R₂	40.725 mm
r₂	25.65 mm
Z	9

Altres aspectes de la simulació que no són de la bomba són:

Taula 7.2 Paràmetres de la simulació

Paràmetres	
Velocitat de gir de l'engranatge exterior	23.271 <i>rad/s</i>
Viscositat inicial del fluid	0.028 <i>Kg/m · s</i>
Densitat inicial del fluid	2719 <i>Kg/m³</i>

7.2. Característiques del mallat

Per realitzar la simulació fluidodinàmica amb el software Fluent cal mallar els elements. Una malla consisteix en una discretització del medi que permet la solució de les equacions. Al CFD es discretitzen les variables contínues, com per exemple la velocitat o la pressió, per un número finit de punts anomenats nodes. D'aquesta manera es passa de treballar amb equacions integrants a fer-ho amb equacions algebraiques. Al resoldre les equacions s'obtenen els valors de les variables discretitzades per cada node.

Per aquest projecte s'ha fet servir una malla mixta , amb zones estructurades i zones no estructurades, 2.5 D. Això implica que totes les cel·les que la componen són prismes rectangulars o triangulars com el que es pot observar en la imatge.

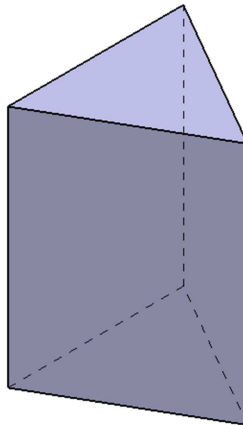


Figura 7.15 Cel·la tipus del mallat

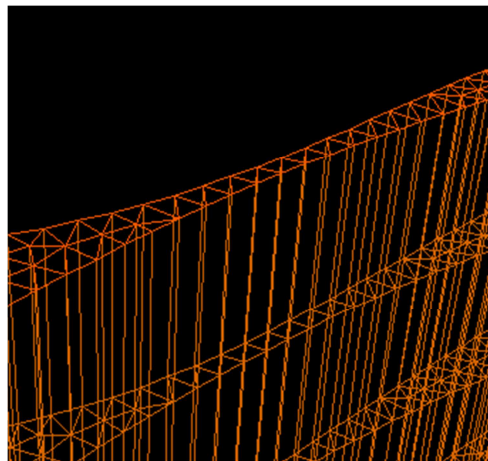


Figura 7.16 Cel·les del mallat

En la zona de fluid entre els engranatges, que és la zona més important per la simulació, la malla està formada per nou capes en la direcció axial de tal forma que la xarxa de triangles s'extreuix en la direcció axial i es talla en plans que separen el volum de fluid en diferents cel·les, d'aquí el nom de 2,5 D ja que tot i ser en tres dimensions es repeteix el mateix dibuix en els diferents plans.

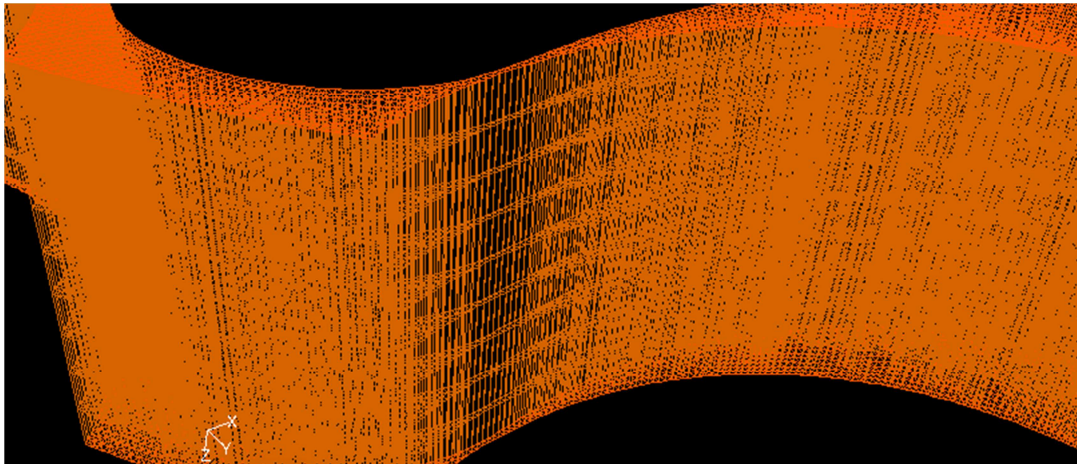


Figura 7.17 Capes del mallat

Una propietat important del mallat del fluid que es troba entre els engranatges són les dimensions de la malla. Per necessitats de la UDF desenvolupada en la zona on es troben els punts de contactes entre els perfils dels engranatges ha d'haver una sola cel·la. Aquest detall es pot veure clarament en la figura 7.17 i amb més facilitat a la figura 7.16. D'aquesta manera la distància entre els perfils es pot calcular amb propietats geomètriques d'una triangle. Això pot semblar contraproductiu al restringir la densitat de la malla, quantitat de cel·les per unitat de volum, ja que amb una major densitat el model s'apropa més a la realitat, però la malla actual ja compleix les necessitats de densitat.

En la següent imatge es pot observar el mallat de fluid complet.

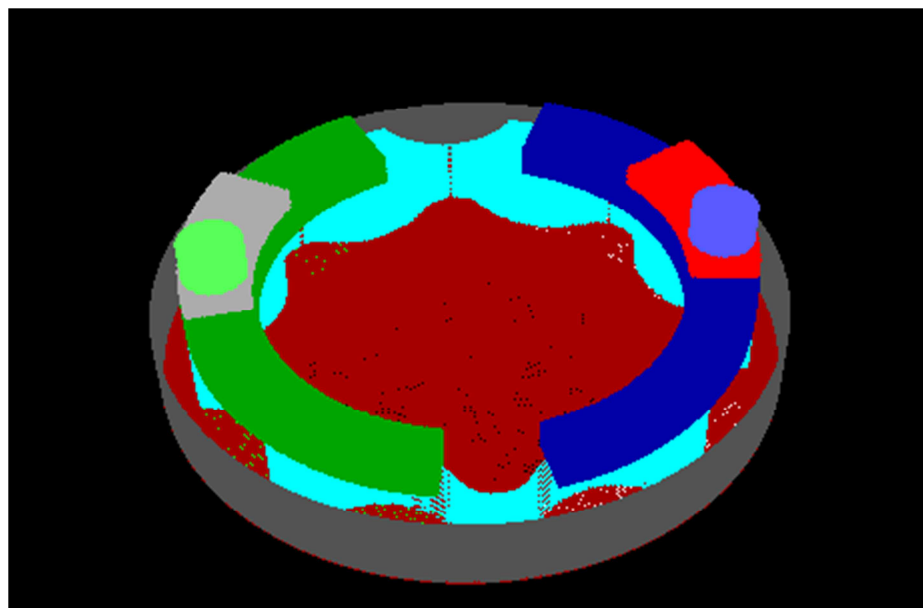


Figura 7.18 Mallat sencer

Per poder comprendre fàcilment les característiques de cada zona a continuació es presenten les altres zones de la bomba i el tipus de mallat en elles:

- Tubs d'entrada i sortida:
És la connexió amb els tubs d'entrada i sortida. La malla és de tipus estructurada 2,5 D.

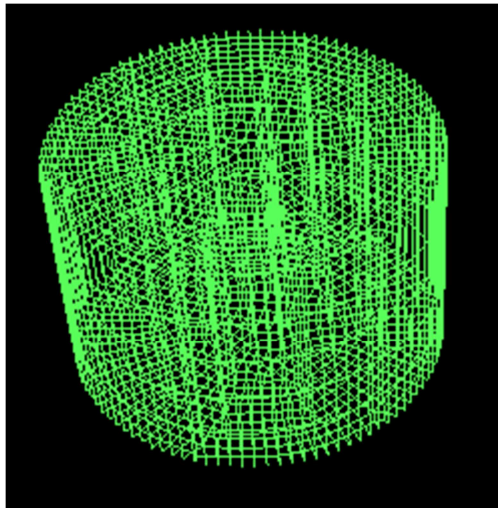


Figura 7.19 Mallat d'entrada

- Lumbreres superiors:
Comuniquen l'entrada o la sortida amb la lumbrera principal. El seu mallat és estructurat 2,5 D.

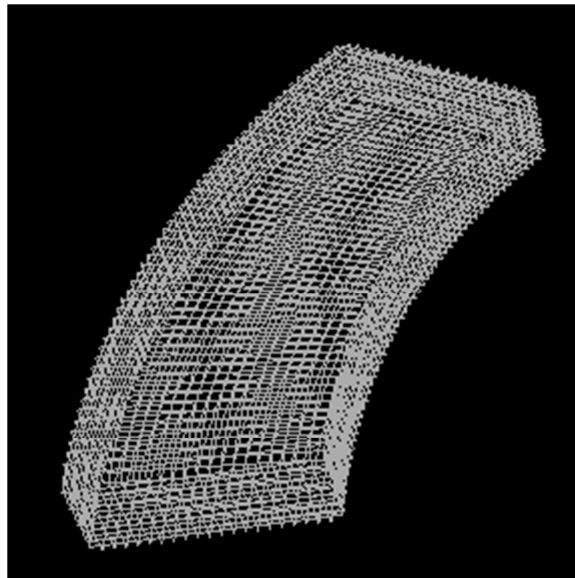


Figura 7.20 Mallat lumbrera superior d'entrada

- Lumbreres principals:
Es connecten amb el fluid entre engranatges. El seu mallat és estructurat 2.5 D.



Figura 7.21 Mallat lumbrera principal d'entrada

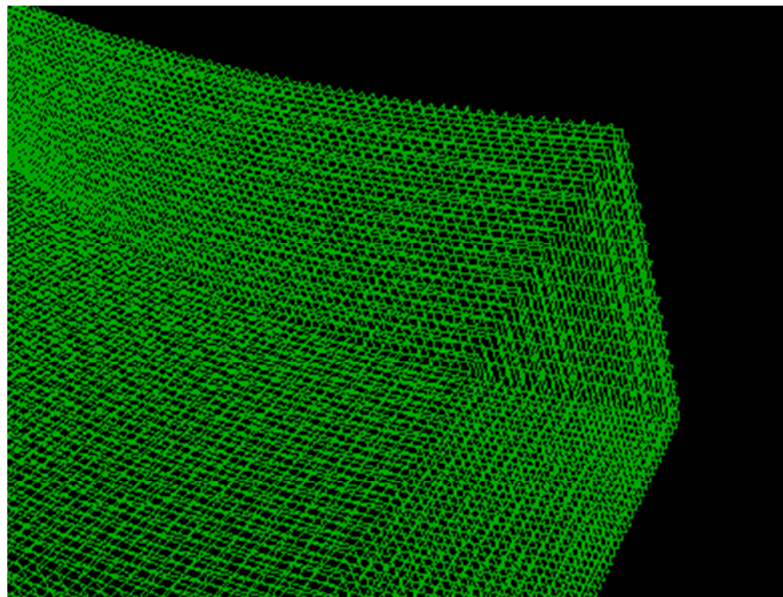


Figura 7.22 Detall a la zona inferior de la lumbrera principal d'entrada

- Fluid entre engranatge exterior i paret lateral
El diàmetre de la cavitat on es troben els dos engranatges és unes micres major que el diàmetre de l'engranatge exterior simulant d'aquesta manera una tolerància de fabricació i el sistema de lubricació de la mateixa bomba. El mallat en aquesta zona és estructurat i 2,5 D.

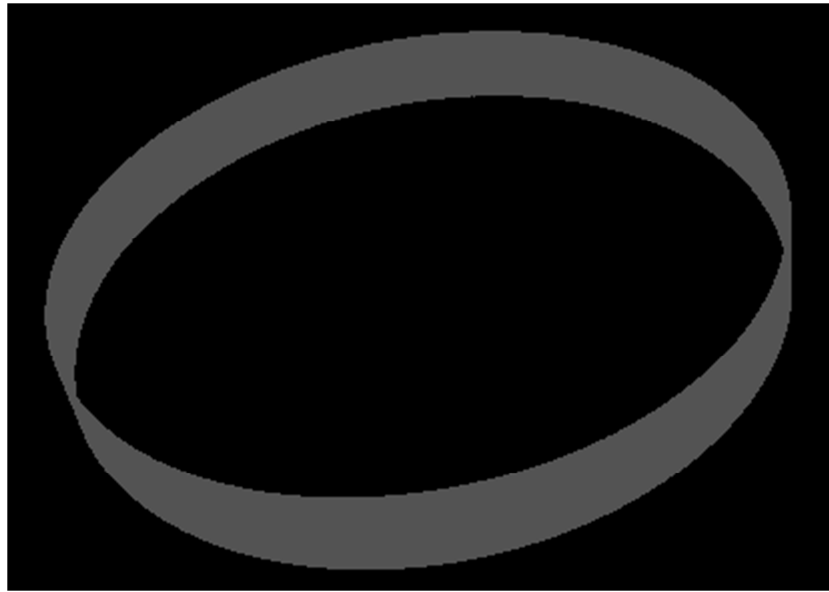


Figura 7.23 Mallat de la cavitat de lubricació lateral

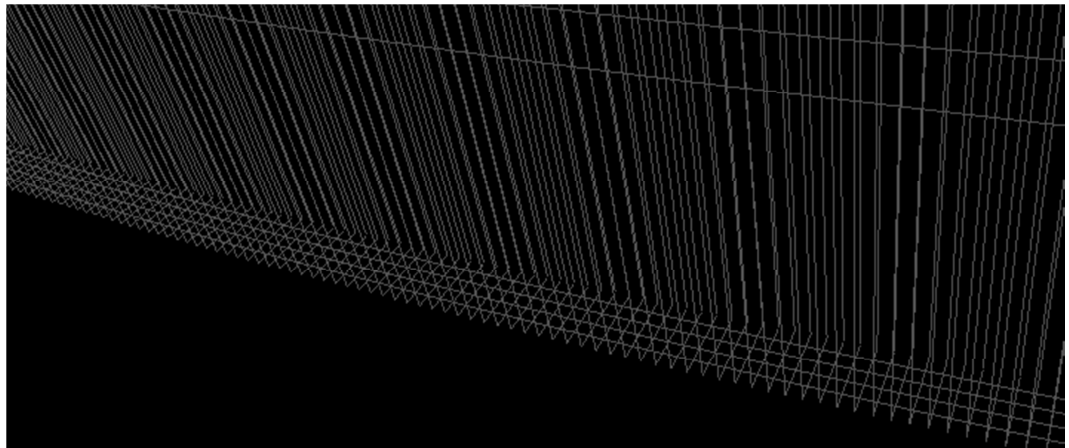


Figura 7.24 Detall al mallat de la cavitat de lubricació lateral

- Fluid entre engranatges i base
Al igual que la separació entre l'engranatge exterior i la carcassa també hi ha una separació entre els engranatges i la carcassa a la seva base amb el mateix objectiu, simular toleràncies de fabricació i sistema de lubricació. A més a més d'aquesta manera es consideren petites fuites que es produeixen entre els tres elements. El mallat és no estructurat i 2,5 D.

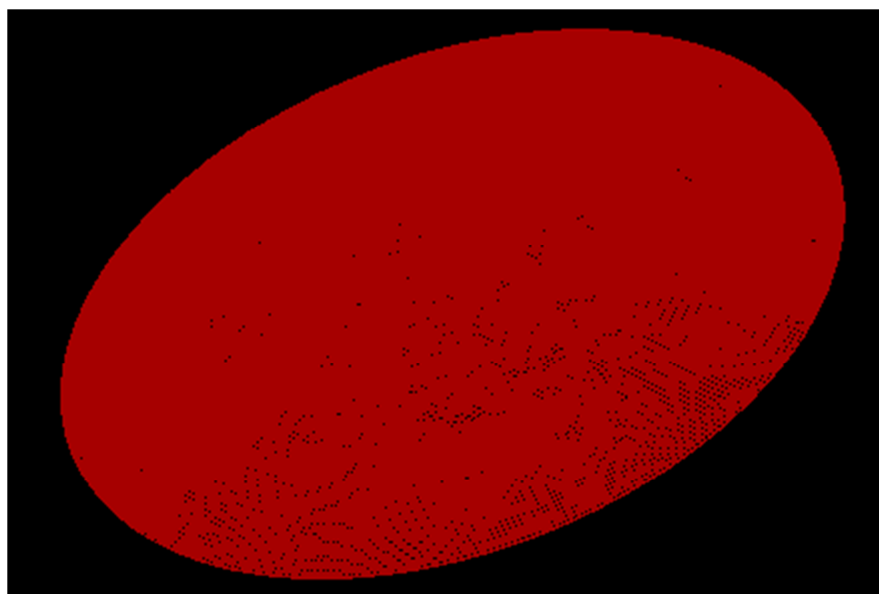


Figura 7.25 Mallat de la separació entre engranatges i base

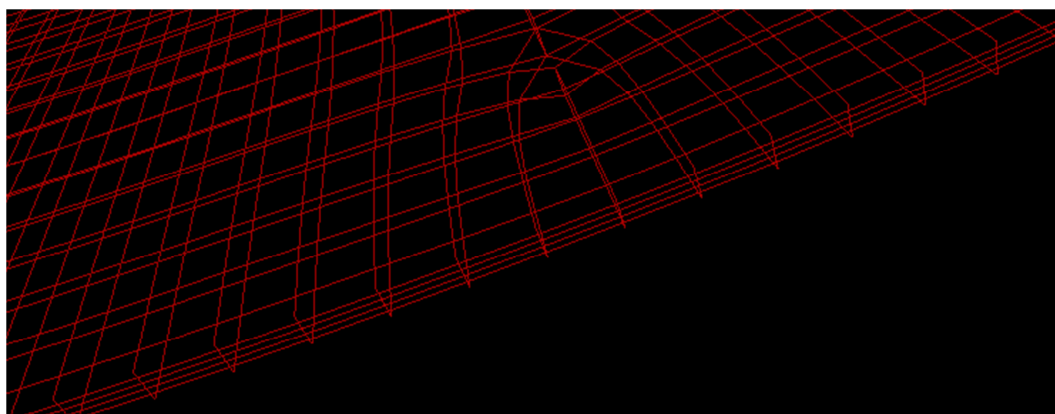


Figura 7.26 Detall al mallat de la separació entre engranatges i base

8. Anàlisi fluidodinàmic

Per realitzar la simulació de la bomba s'ha utilitzat el codi comercial ANSYS Fluent v6. Aquest programa permet realitzar l'estudi fluidodinàmic d'elements fixos, com per exemple sistemes de canonades o d'una ala d'avió, com d'elements amb moviments relatius entre ells, com per exemple vàlvules de papallona o bombes.

Tot i això el software requereix d'un subprograma exterior, User-Defined Function (UDF), per desplaçar la malla i calcular certes propietats de les cel·les. És aquest subprograma el que s'ha desenvolupat al llarg del projecte.

Segons el manual oficial de UDF una User-Defined Function és una funció que l'usuari es programa i pot ser carregada amb el *solver* de ANSYS FLUENT per millorar les prestacions estàndard del codi.

El llenguatge que es fa servir per a la programació de la UDF està basat en C i inclou una gran varietat de funcions que pretenen facilitar i donar la capacitat de treballar amb Fluent. La major part d'aquestes funcions es poden trobar al manual oficial de UDF on hi ha una explicació de les funcions i característiques i exemples del seu funcionament.

Tot el codi de la UDF ha estat escrit a mà amb un editor de textos i testejat a Fluent per comprovar que fos correcte l'escriptura.

La manca d'un "debugger", software que facilita trobar errors en el codi i que podríem fer un símil amb el corrector ortogràfic dels editors de textos, ha implicat un augment considerable del temps necessari per desenvolupar el codi fent que cada variació s'hagués de comprovar amb una petita simulació, reduint el número d'iteracions per cada instant de temps, en Fluent i finalment amb una simulació completa una vegada es va arribar al codi final.

A l'hora de mallar es va fer de tal forma que el diàmetre de l'engranatge exterior fos 250 micres major i d'aquesta manera es considera una tolerància de fabricació, però això va provocar que el contacte entre les dents dels engranatges no es produeixi, unint totes les cambres en una sola. Per solucionar aquest problema la UDF varia la viscositat de la cel·la anomenada punt de contacte.

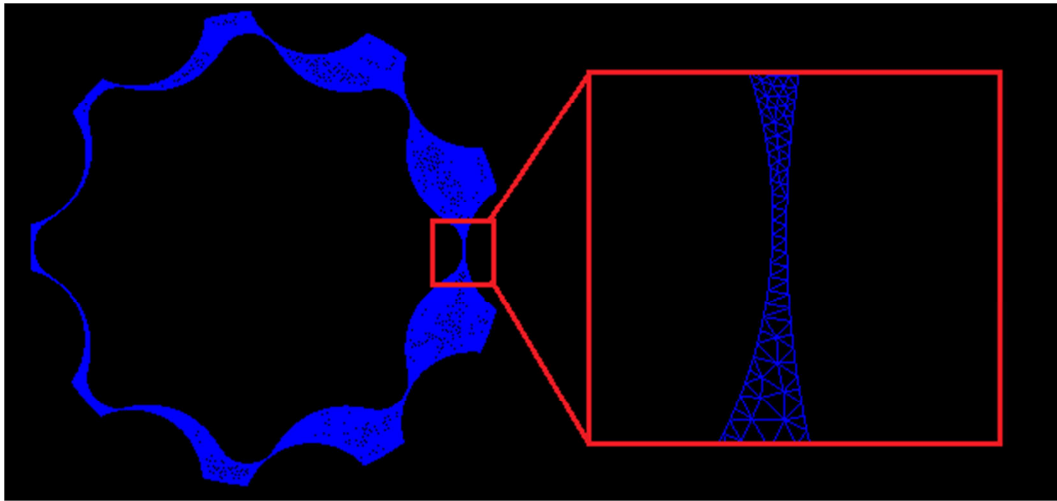


Figura 8.1 Imatge del mallat amb detall a la zona del punt de contacte

Després de cada instant de temps Fluent mou els perfils, tal i com se l'indica a la UDF, i deforma la malla per adaptar-se a la nova posició. Si es necessari, és a dir, si la mida de les cel·les supera els límits establerts es remalla la zona separant o fusionant cel·les per complir amb les especificacions de la simulació.

Aquest procés es repeteix per cada instant de temps com es veurà més endavant en el diagrama d'operacions de la simulació.

8.1. Base de la simulació

Per a la realització del projecte s'ha partit de una UDF proporcionada pels professors Pedro Javier Gàmez-Montero i Mercedes García Vílchez del departament de mecànica de fluids de l'ETSEIAT. En aquesta UDF es realitza la modificació de la viscositat, rotació dels centres de gravetat dels engranatges i l'assignació de la densitat i la velocitat del so.

La rotació dels centres de gravetat es necessària al realitzar un moviment de la malla, Fluent mou la geometria a partir del centre de gravetat. Ambdós centres de gravetat coincideixen amb els orígens O_1 i O_2 que es veuen en la figura 7.12. Per tant només calen les components de les velocitats que s'extreuen d'una velocitat de gir per l'engranatge exterior (ω_{ext}) donada que es relaciona amb la velocitat de gir de l'interior (ω_{int}) com es pot veure:

$$\omega_{ext} = 2 \cdot \frac{\pi}{Z} = \frac{8}{9} \cdot \omega_{int} \quad (8.1.1)$$

La densitat i la velocitat del so són necessàries per a la resolució del solver de Fluent i s'utilitzen les equacions que el mateix Fluent proporciona al manual oficial per calcular-les a la UDF.

En canvi la viscositat es part fonamental de la simulació no només pel fet que és necessària per les equacions si no també perquè és l'eina que s'utilitza per separar les cambres que queden entre les dents. Com ja s'ha dit amb anterioritat el diàmetre de l'engranatge exterior és unes micres major i per tant no hi ha contacte entre les dents. Per simular aquest contacte s'augmenta la viscositat de la cel·la que correspon al punt de contacte. Aquest sistema va ser desenvolupat i anomenat *viscous wall-cell* per P J Gamez Montero.

El sistema consisteix en trobar per cada time step, instant de temps, de la simulació les cel·les on la distància entre els perfils dels engranatges interior i exterior són més a prop, les anomenades cel·les punt de contacte. Per fer-ho examina la distància entre els centroides de les cel·les i el punt de contacte teòric. La cel·la amb la menor distància serà la cel·la punt de contacte. Per tant s'augmenta la viscositat d'aquesta cel·la així com a les més properes, dins un radi d_{max} que s'ha escollit per conveni 600 μm , per evitar un problema en el càlcul degut a gradients molt alts amb una distribució lineal segons la seva distància que es la següent:

$$\mu_{cel\cdot la} = \mu_{max} - \frac{\mu_{max} - \mu_{oli}}{d_{max}} \cdot d \quad (8.1.2)$$

On μ_{oli} és la viscositat de l'oli, μ_{max} és una viscositat varies vegades superior a la de l'oli, d és la distància entre el centre de la cel·la i el punt de contacte teòric i $\mu_{cel\cdot la}$ és la viscositat final de la cel·la.

El resultat obtingut es pot observar en la següent imatge.

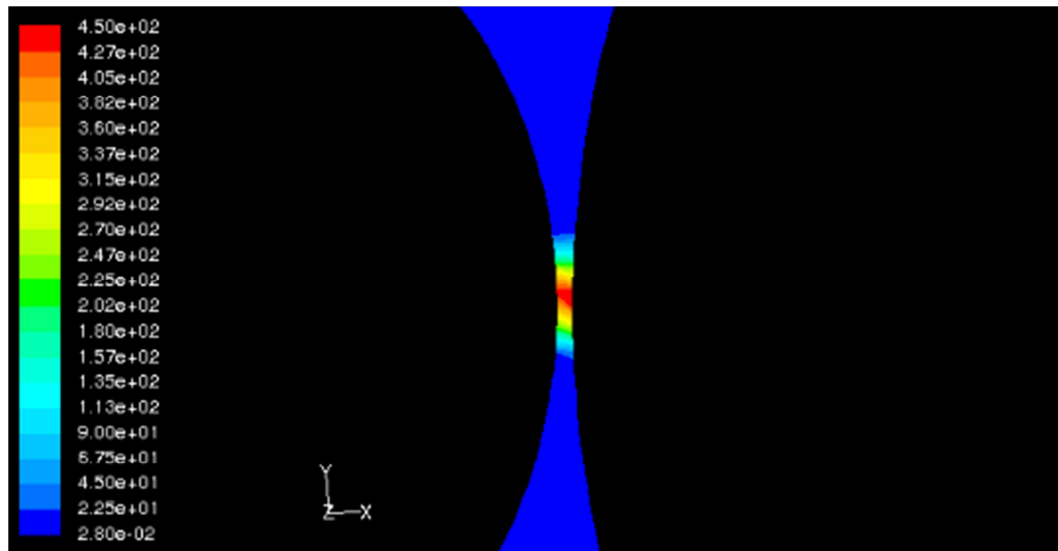


Figura 8.2 Viscositat del fluid amb *Gearing contact point*

La professora Mercedes Garcia va desenvolupar un mètode basat en el *viscous wall-cell* que millora substancialment el temps de càlcul de la simulació anomenat *Gearing contact point*. La principal millora que introdueix aquest nou mètode és la cerca teòrica de la zona on es trobarà el punt de contacte real.

Mitjançant la següent relació es pot trobar a quin angle es troba el punt de contacte per cadascuna de les dents de l'engranatge exterior.

$$\alpha_{pc} = j \cdot \gamma + \omega_{ext} \cdot t \quad (8.1.3)$$

On j és el número de dent de l'engranatge interior, tenint en compte que la dent 0 és la que es troba més a la dreta en la figura 8.1 i la resta es contenen en sentit antihorari. γ és la separació angular d'un punt d'una dent fins al mateix punt de la següent dent, $\frac{360^\circ}{9}$ per aquesta bomba i t és el temps passat des de l'instant de la imatge.

La col·locació dels engranatges en l'estat inicial és fonamental i ha de coincidir amb la utilitzada per calcular el punt de contacte teòric, es pot observar en la figura 8.1.

Amb aquesta cerca es pot determinar una regió on es trobarà el punt de contacte real de la simulació amb una tolerància angular $\pm \delta\alpha$ que es pot variar en funció de la precisió desitjada. D'aquesta manera es redueix la zona on es realitza la cerca optimitzant aproximadament fins a un 40% el temps de càlcul amb comparació al mètode *viscous wall-cell*.

A continuació podem observar el pseudocodi de la UDF:

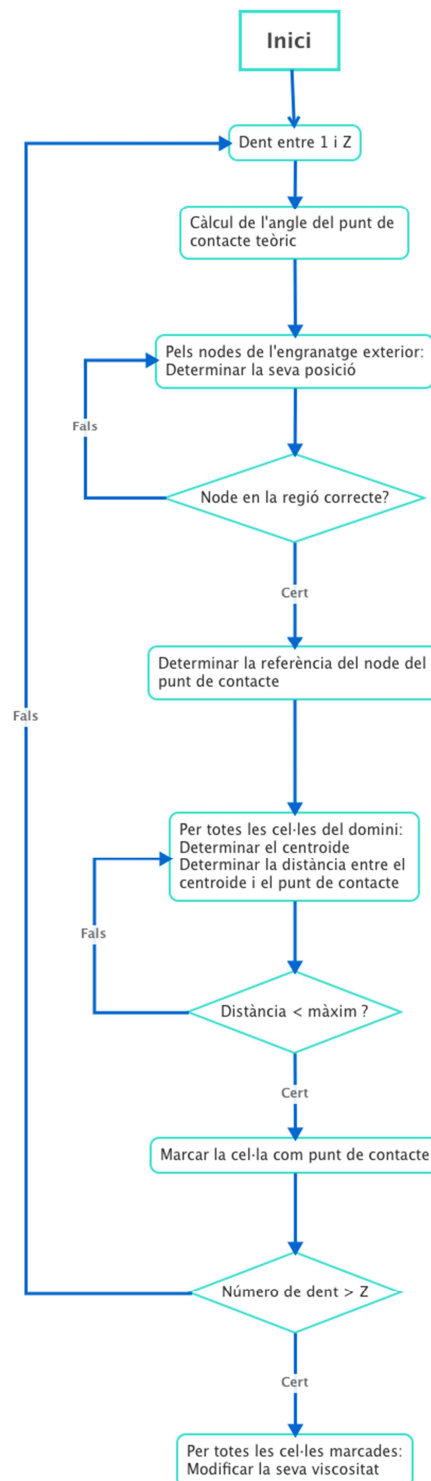


Figura 8.3 Pseudocodi mètode *Gearing contact point*

El pseudocodi permet analitzar amb facilitat el programa. Cal explicar certs aspectes per poder comprendre'l.

El mateix codi Fluent estableix una referència única per cada cel·la de la malla que es pot saber amb la funció pertinent.

Per facilitar el desenvolupament del codi i evitar redundàncies s'utilitza un bucle que calcula el punt de contacte en una sola dent i es repeteix per les següents d'una en una. D'aquesta manera s'aconsegueix reduir la longitud del codi que en un principi pot semblar que no es una gran desavantatge, però un codi de menor llargada es carrega i compila amb una major rapidesa.

8.2. Mètodes de càlcul de la distància

El criteri per trobar la cel·la de punt de contacte que s'utilitza en la UDF proporcionada pels professors, la distància entre el centre de la cel·la i el punt de contacte, pot fallar en no ser aquest la raó de que la cel·la sigui o no el punt de contacte. Es a dir, perquè una cel·la sigui punt de contacte la distància entre les dents ha de ser mínima en aquesta cel·la ja que el punt de contacte de la simulació pot no estar exactament en el punt de contacte teòric, ja que aquest no considera les toleràncies de fabricació. Un dels objectius de la UDF es que sigui capaç de trobar aquesta distància.

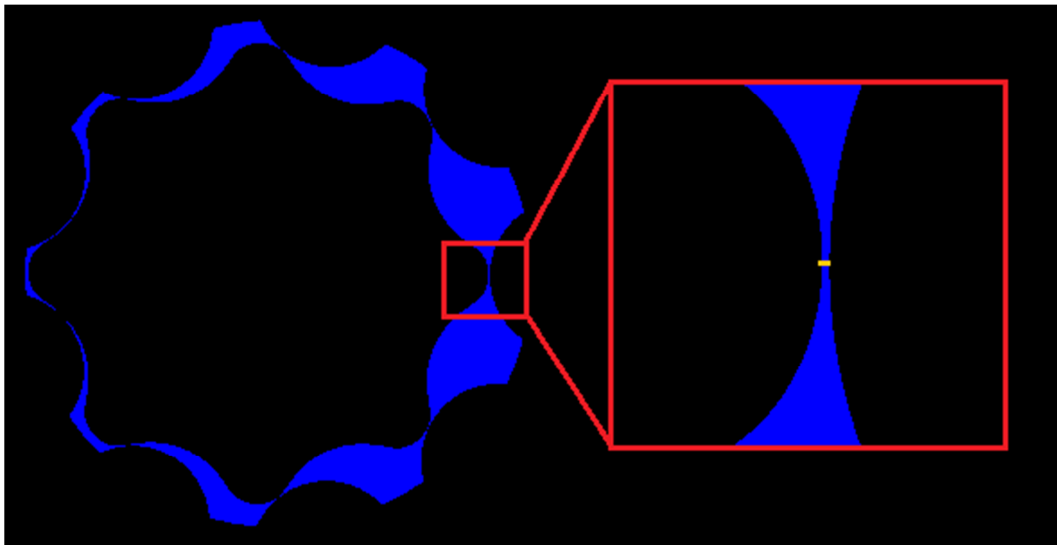


Figura 8.4 En groc distància entre perfils

En la zona del punt de contacte la separació entre els engranatges és tan reduïda que només hi ha espai suficient per una sola cel·la de tal forma que la separació entre els engranatges és l'altura de la cel·la. Sabut això cal identificar quina és la cel·la per trobar la seva alçada mitjançant la distància entre la recta, base del triangle, i el punt, el node restant.

L'equació de la distància entre una recta y genèrica i un punt A utilitzada es pot observar a continuació:

$$D = \frac{|a \cdot x_A - y_A + b|}{\sqrt{a^2 + 1}} \quad (8.2.1)$$

$$y = a \cdot x + b \quad (8.2.2)$$

$$A = (x_A, y_A) \quad (8.2.3)$$

A partir d'aquesta relació es pot trobar la distància mínima entre els dos elements, però aquesta distància pot no ser la distància mínima entre la recta i el

node de la cel·la. Si s'observa la següent figura es pot veure un cas on la distància obtinguda per l'equació 8.2.1.

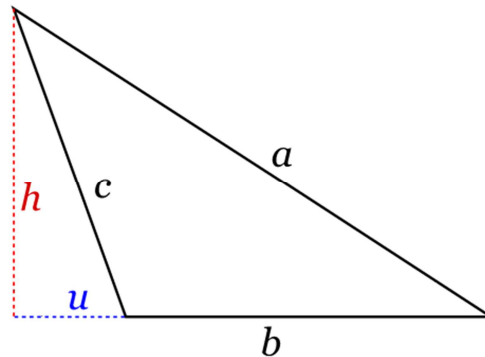


Figura 8.5 Cel·la deformada

Donat que la malla es deforma a cada instant de temps degut al moviment es possible que les cel·les arribin a la situació de la figura 8.5 on la distància h és més petita que la c , però h no és la distància entre els perfils.

Aquest problema es soluciona fàcilment comprovant que la deformació de la cel·la no arriba a aquest extrem i si ho fes es rebutja la distància h en favor de c o a després de comprovar quina de les dos és menor.

Per arribar al sistema final que utilitza la UDF es va passar per altres sistemes que per diferents raons que a continuació s'explicaran es van descartar. En concret es van desenvolupar cinc codis, cadascun és una evolució de l'anterior, els quatre primers són incorrectes o no s'ha aconseguit que funcionin i l'últim és l'únic que aconsegueix complir l'objectiu.

Tots aquest mètodes comparteixen un objectiu, calcular la distància entre els perfils a partir de la recta que formen dos dels nodes i el node restant. La diferència entre ells és com assolir aquest objectiu.

A més a més donades les característiques de la malla és indiferent per quin pla, el superior o inferior, de la cel·la es calculi la distància per això s'ha decidit per conveni utilitzar per tots els càlculs el pla superior de la cel·la.

Una altra característica que comparteixen aquest mètodes és el fet que no es descarta per complet el mètode *Gearing contact point*, és a dir, com amb aquest mètode es redueix considerablement el temps centrant-se en una zona restringida es mantindrà aquesta condició aprofitant així l'optimització del càlcul. Per ser més exactes es tracta de la condició "Node en la regió correcta?" que es pot observar en els pseudocodis.

Per facilitar la comprensió de la càrrega de treball que suposa el desenvolupament dels codis es pot observar en la següent figura quin ha estat el repartiment d'hores dedicades als diferents mètodes del total de temps destinat als codis.

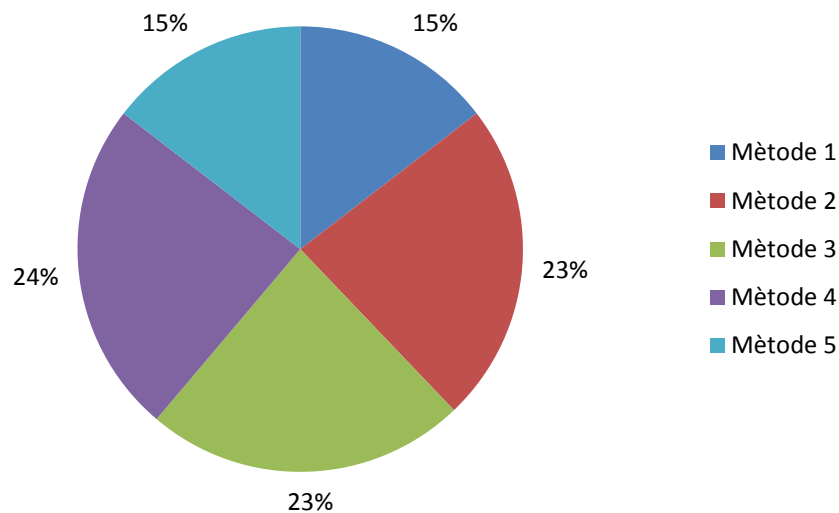


Figura 8.6 Distribució càrrega de temps

8.2.1. Comparació dels Threads

L'usuari, en el codi ANSYS Fluent, estableix uns grups d'elements, com ara cares o cel·les, segons la geometria anomenats *threads*. El mateix Fluent crea altres *threads* automàticament per qüestions internes del codi i l'usuari pot treballar amb ells. En el cas de la bomba gerotor, dins de la UDF utilitzada, s'han definit en concret tres *threads* de rellevància pel projecte: un format per la paret de l'engranatge interior, un altre per la paret de l'engranatge exterior i l'últim format per les cel·les de fluid.

L'objectiu d'aquest mètode és comprovar si la cara de la cel·la de fluid és també una cara del *thread* d'un dels engranatges i llavors comprovar que el node oposat és també node del *thread* de l'altre engranatge. D'aquesta manera es verifica que la cel·la es troba en la zona de punt de contacte ja que tan sols les cel·les d'aquesta zona tenen contacte amb tots dos engranatges a la vegada.

El pseudocodi per aquest sistema és el següent:

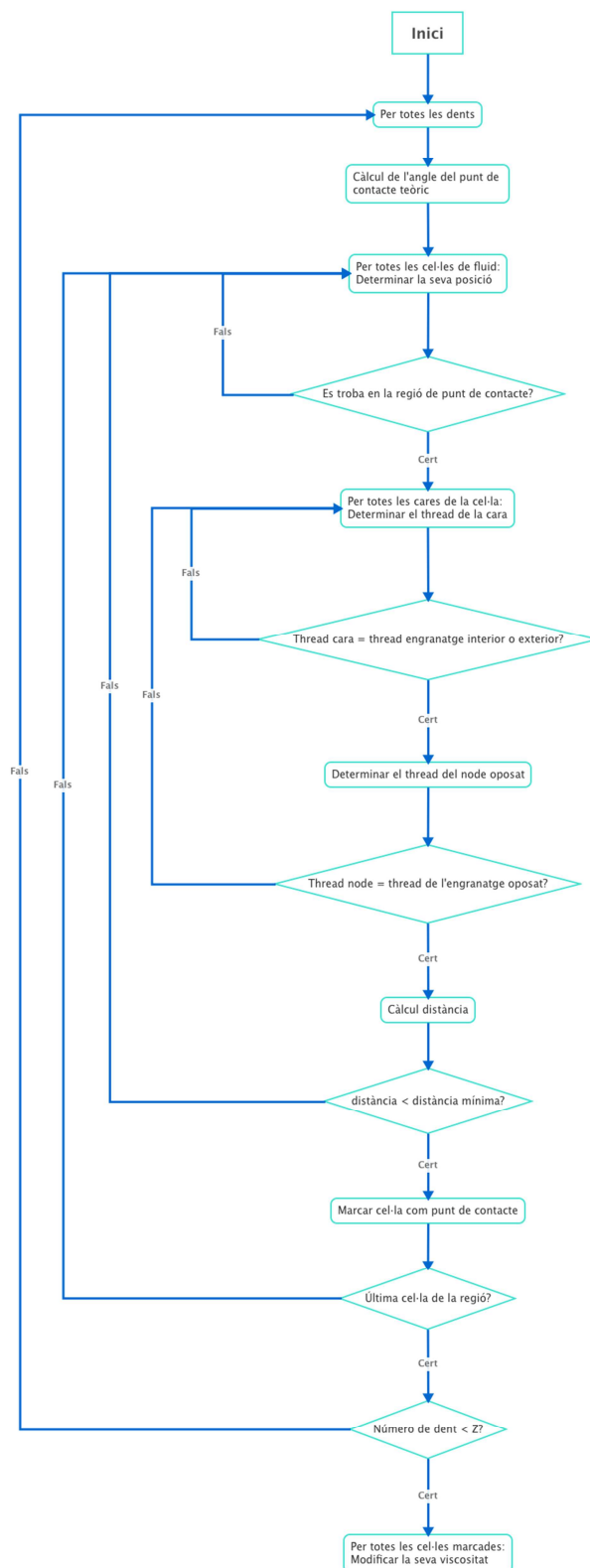


Figura 8.7 Pseudocodi mètode 1

L'idea és senzilla però esta limitada pel llenguatge i sobretot per l'incapacitat de l'UDF de realitzar aquesta comparació entre dos *threads*, ja que les funcions que permeten determinar el *thread* de la cel·la adjacent per una cara només treballen amb cel·les del mateix *thread*.

Aquestes dos funcions, F_C0 i F_C1, retornen la referència de la cel·la la qual el vector àrea de la cara estudiada és positiu per la primera funció i negatiu per la segona funció. Això es pot entendre més fàcilment amb la següent imatge extreta del manual oficial sobre UDF de Fluent.

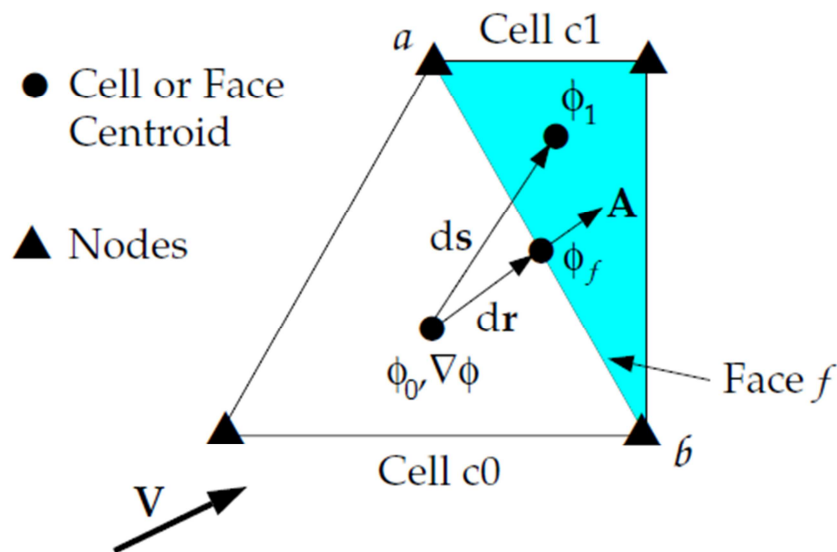


Figura 8.8 Esquema funcionament funcions F_C0 i F_C1

Com es pot veure per la cara estudiada, f , si s'analitza des de la cel·la $c0$ la funció F_C0 retornarà la referència de la cel·la $c0$ ja que el vector àrea, A , és positiu. Mentre que la funció F_C1 retornarà la referència de la cel·la $c1$.

Ara bé, si s'analitza des de la cel·la $c1$ el resultat serà oposat ja que el vector àrea serà el mateix però invertit.

8.2.2. Comparació dels centroides

Limitats per l'incapacitat de comparar entre elements dos *threads* diferents s'intenta evitar el problema a través de les coordenades dels centroides de les cares. Així doncs per cada cel·la de fluid es busca si el centroide d'alguna de les seves cares coincideix o es troba dins d'una tolerància amb el centroide d'una cara de qualsevol dels altres dos *threads*.

El centroide o baricentre d'una cara és el punt on es tallen totes les rectes que divideixen el pla en dos parts de iguals volums.

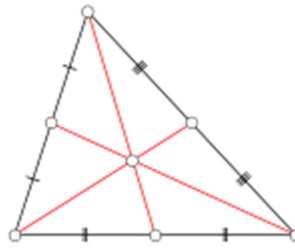


Figura 8.9 Exemple centroide d'un triangle

L'objectiu és el mateix que amb el mètode anterior, determinar la base del triangle per després, un cop es sap la recta, trobar el node restant que completa la figura. Un cop trobats els dos elements es pot calcular la distància entre la recta i el node. Aquest procés es repeteix per totes les cel·les i es comparen les distàncies calculades per trobar les més petites en cada zona de contacte i per tant per trobar quina és la cel·la punt de contacte.

A continuació es pot observar el pseudocodi:

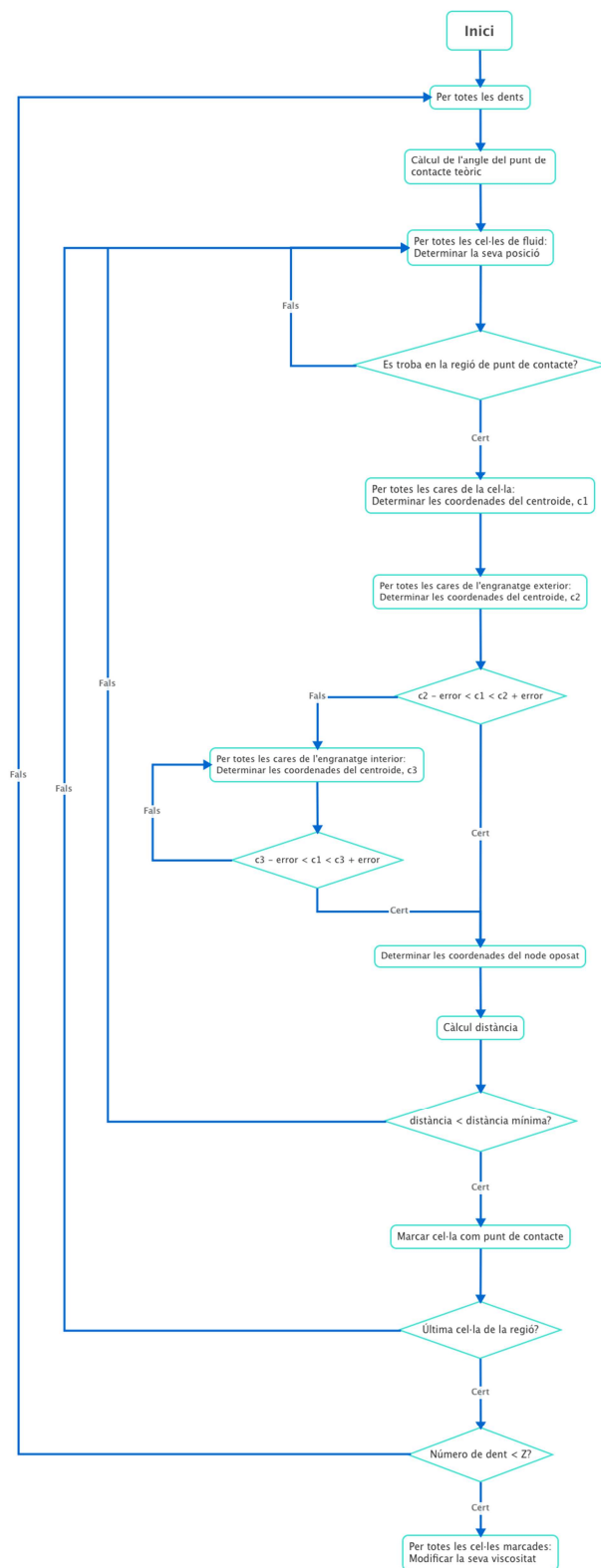


Figura 8.10 Pseudocodi mètode 2

Tot i això aquest sistema no s'ha pogut desenvolupar degut a l'enorme cost de càlcul que suposaria per l'ordinador i a la dificultat en trobar coincidències entre els centroides de les cares dels diferent *threads*.

8.2.3. Cerca de les cares laterals de les cel·les

Amb l'objectiu de reduir la càrrega de càlcul es va introduir al codi el requeriment per realitzar la comparació de que la cara que té contacte amb l'engrenatge fos lateral i per tant fos rectangular.

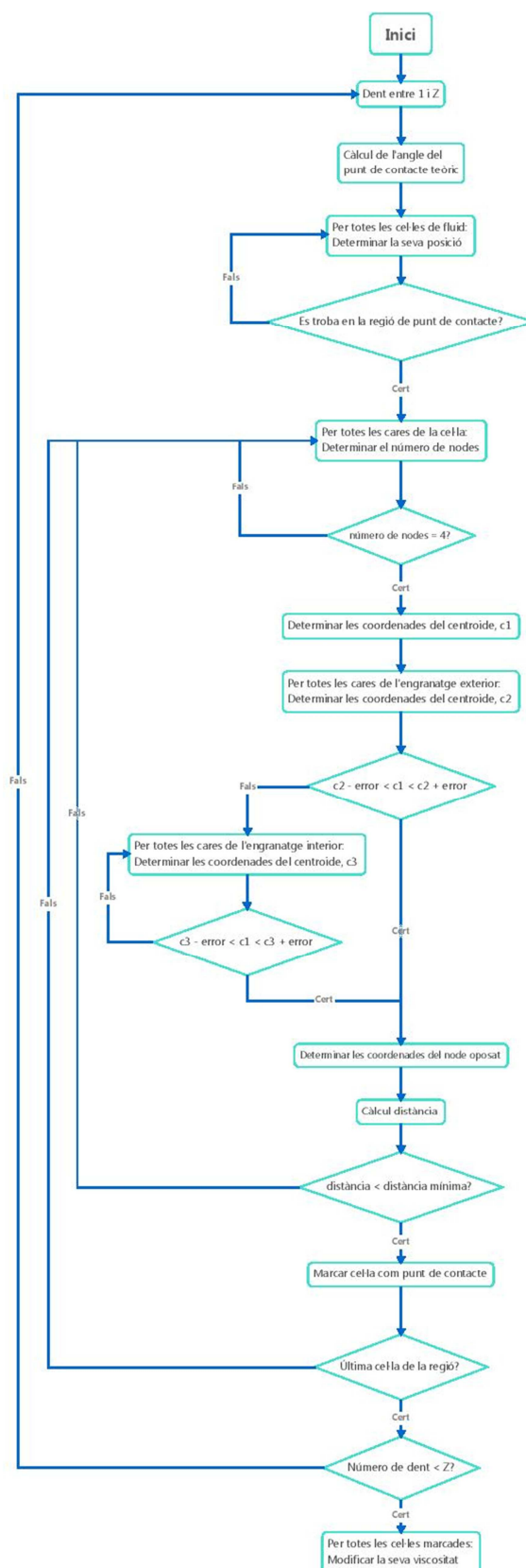


Figura 8.11 Pseudocodi mètode 3

En aquest cas l'impediment trobat ha estat degut a que la funció que retorna el número de nodes d'una cara tornava dades sense sentit. Per una cel·la hi ha cinc cares, dos triangulars, de tres nodes cada una, i tres rectangulars, de quatre nodes. Tot i això quan es demanava a la funció C_FACE el numero de nodes d'una cara qualsevol de la cel·la tornava sis, cosa que no es només falsa sino que a més a més si es dibuixen aquest nodes, a partir de les seves coordenades, es veu clarament que és una cel·la i no una cara.

Tot i contactar amb el servei de consultes de Fluent per demanar assessorament no es va rebre resposta i per tant es va descartar aquest sistema sense poder determinar quina és la causa aquest error.

8.2.4. Radi de la corba de punts de contacte

Una característica geomètrica de la bomba és la corba de punts de contacte que ja s'ha vist anteriorment, en aquesta corba es troben tots els possibles punts de contacte dels engranatges.

Així doncs el punt de contacte real de la simulació ha de ser molt a prop sino és sobre aquesta mateixa corba teòrica.

L'idea en què es basa aquest sistema per determinar quins són els dos nodes que formen la recta i per tant estan a un dels dos perfils i quin és el node oposat és a partir del radi de la corba de punts de contacte. Es calcula el radi de cada un dels nodes i els dos que queden per sobre del radi de la corba de punts de contacte o per sota són els que formen la recta.

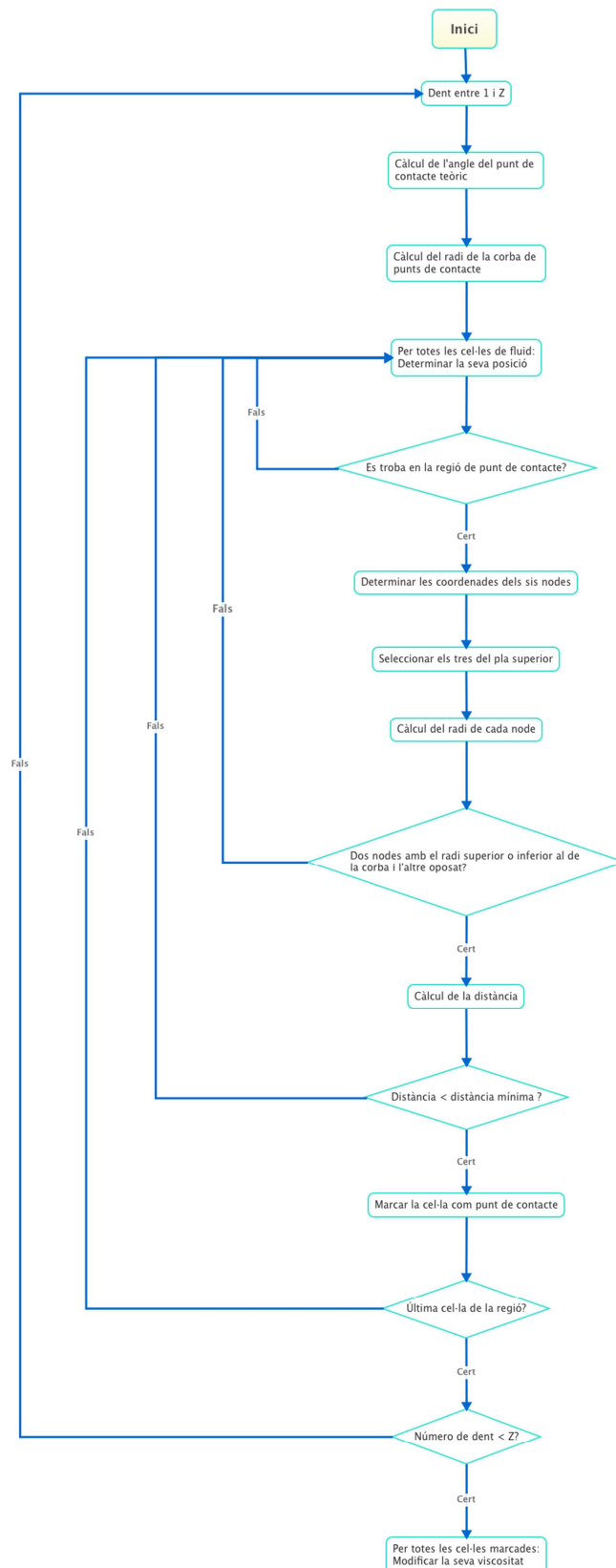


Figura 8.12 Pseudocodi mètode 4

Si s'observa la figura 7.12 i més concretament el punt B que es troba en la zona esquerra del muntatge pot semblar que el sistema de radi de la corba de punts de contacte sigui correcte però si es canvia de punt de contacte queda patent que aquest sistema no funciona amb tots els punts de contacte.

Per exemple si s'analitza el comportament del codi en el punt m que es troba en la zona dreta del muntatge es pot veure l'error.

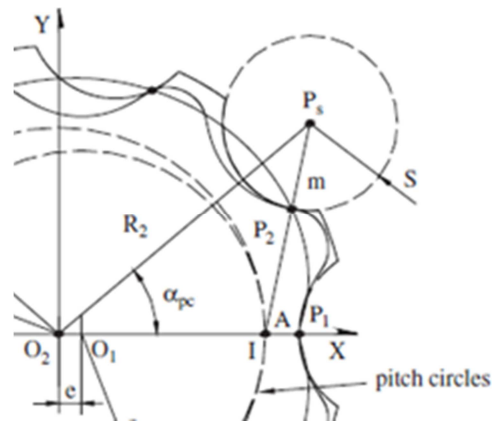


Figura 8.13 Detall punt m

A simple vista pot no semblar obvi on es troba l'error però si s'analitza el mallat queda més clar. En la següent imatge es pot veure un detall del mallat a un punt de les mateixes característiques que el punt m de la imatge anterior.

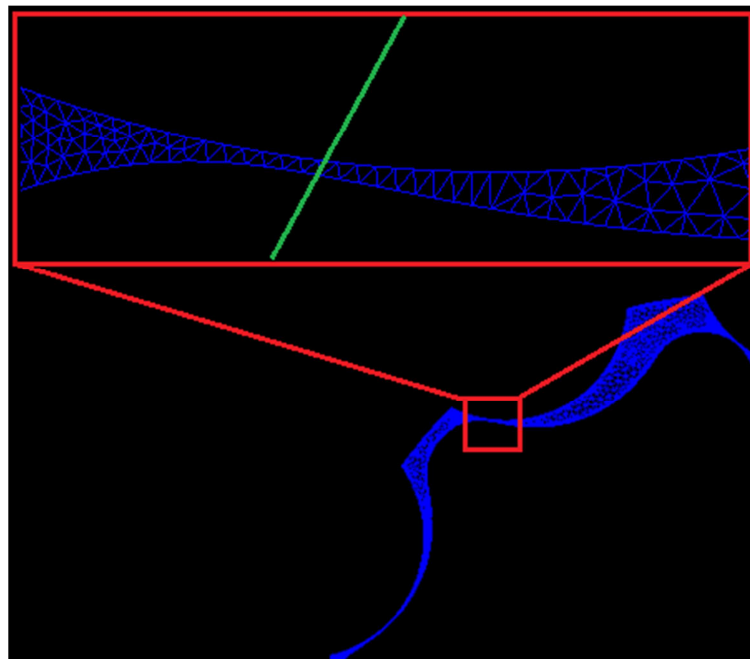


Figura 8.14 Detall mallat punt equivalent a m

El perfil creua la línia de punts de contacte, de color verd, amb un angle considerable i per tant s'allunya de la corba de punts de contacte molt ràpidament fent que moltes cel·les que queden dins la zona de punt de contacte estiguin completament entre la corba i el centre o per sobre la corba. Per tant tots els seus nodes tenen un radi inferior o superior al de la línia de contacte i és impossible comparar-los per saber quins són els que tenen contacte amb cada perfil.

En la següent imatge es podem observar totes les cel·les que podrien ser punt de contacte i que tots els seus nodes queden per sobre el radi, de color vermell, i les que queden per sota, de color gris.

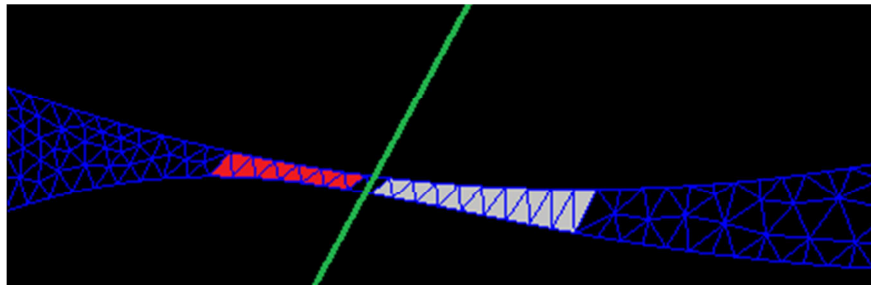


Figura 8.15 Cel·les amb tots els nodes per sobre o sota del radi de punt de contacte

Aquest error és el que porta a descartar aquest sistema.

8.2.5. Radi de la corba de la dent

A partir de l'idea del mètode anterior s'extrau aquest sistema. Però en comptes d'emprar el radi de la corba de punts de contacte s'utilitza el radi de la corba de la dent de l'engranatge exterior. A més a més s'afegeix un altre criteri, el radi amb que es comprovarà si el node està més a prop o no que els altres serà el radi del centroid de la cel·la, d'aquesta manera es millora el sistema reduint les possibilitats d'error.

Ja s'ha vist anteriorment com es genera el perfil de l'engranatge exterior, cada dent està formada a partir de l'arc de radi S des de el punt P_s , com es pot veure a la figura 7.12.

Per tant es pot dir que les cel·les formen un arc de radi S i llavors els nodes que les formen es mantenen dos a un radi superior o inferior i el restant oposat a aquests dos.

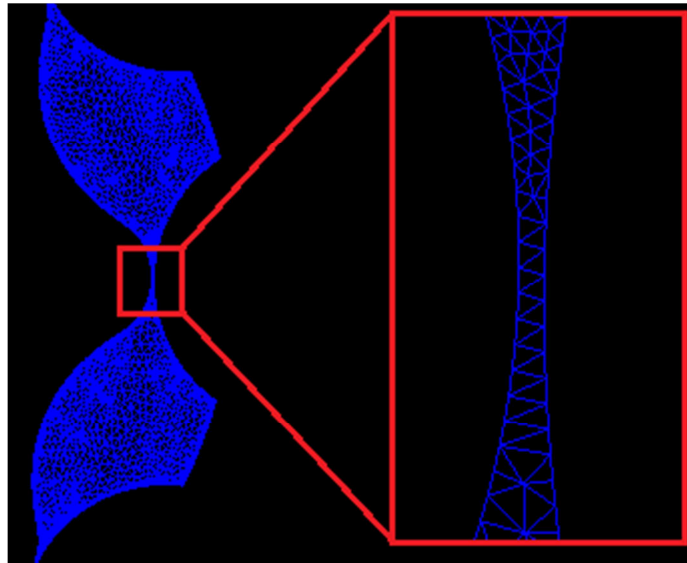


Figura 8.16 Detall cel·les amb radi S

En un principi pot semblar que aquest mètode podria fallar ja que només es comproven les cel·les que tenen contacte amb la corba de radi S , però com l'objectiu es trobar el punt de contacte i aquest només es pot produir entre les dents dels dos engranatges i no amb una dent de l'engranatge interior i la corba exterior de radi G , un altre cop es pot veure en detall a la imatge 7.5, de l'engranatge exterior és innecessari que es comprovi aquesta zona.

Amb el mètode final es poden observar quines són les diferències amb el codi base d'on es partia.

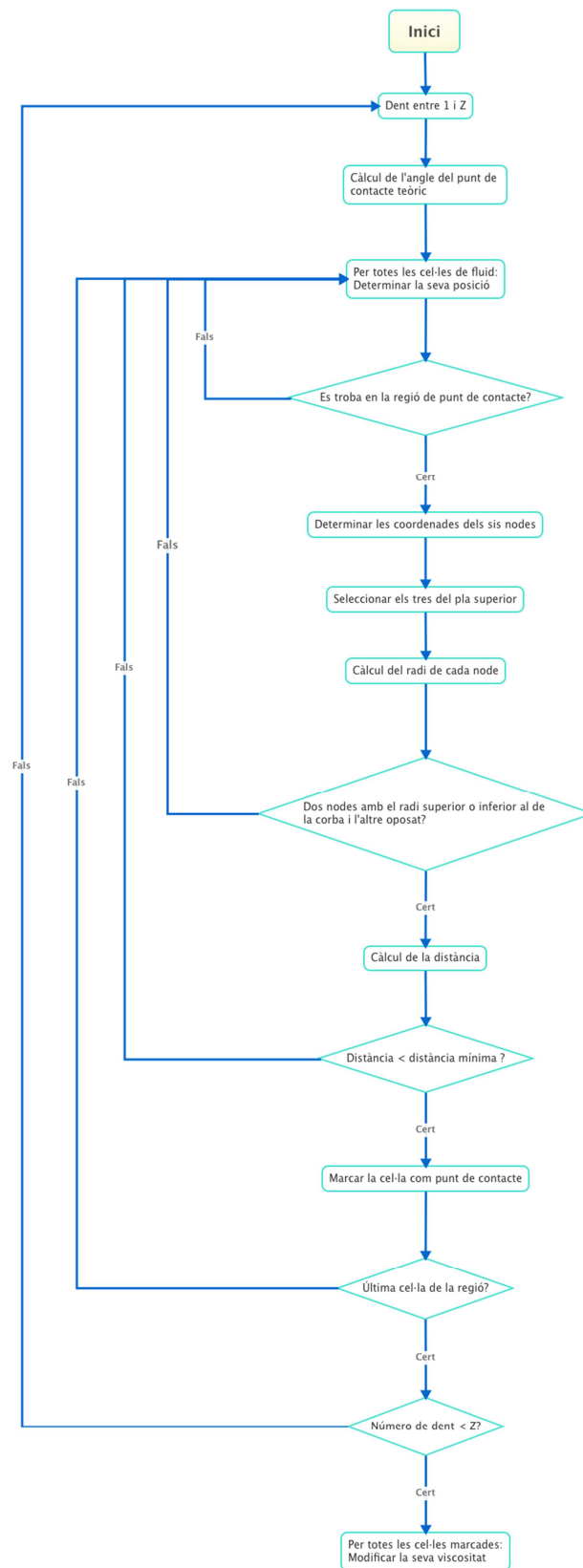


Figura 8.17 Pseudocodi mètode 5

9. Simulació

9.1. Preparació de la simulació

A continuació es presenten les propietats de la simulació realitzada.

L'objectiu d'aquesta simulació és la comprovació que durant el desenvolupament de la nova UDF no s'han vist afectats negativament els resultats de la simulació, per tant, la simulació és en les mateixes condicions que amb la que es compara. A part els models utilitzats han de ser els mateixos així com els mètodes de solució.

La simulació és amb un model transitori o el que és el mateix es produeix un canvi amb el temps.

El model de viscositat utilitzat ha estat el laminar. El tipus d'entrada és *pressure-inlet* que vol dir que es fixa la pressió a les cel·les d'entrada amb un valor, en aquest cas 0 Pa. El tipus de sortida és *pressure-outlet*, un cop més es fixa la pressió de les cel·les però en aquest cas les de sortida i amb un valor de 0 Pa.

Vist les condicions d'entrada i sortida podria semblar que la simulació no produís cap variació ja que ni es força l'entrada de fluid ni la seva sortida, per exemple amb un gradient de pressions. Però com es veurà en els resultats de la simulació si que hi ha moviment de fluid. Això és degut al fet que es dona moviment als engranatges i per tant actuen com bomba absorbint fluid de l'entrada i forçant-lo a sortir per l'altra banda.

L'algoritme de *solver* utilitzat és el SIMPLE que és el que es configura per defecte i és un algoritme que permet operar a l'algoritme amb relativa rapidesa.

La resta de la configuració es pot veure en la figura següent:

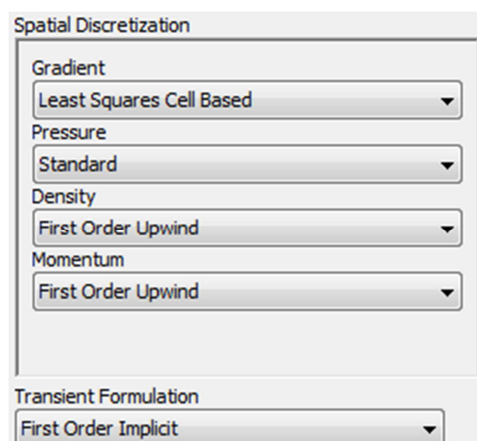


Figura 9.1 Configuració del *solver*

Cal destacar que per les equacions de la densitat i el moment s'ha escollit l'esquema *First Order Upwind*.

En la següent taula es poden veure els valors d'algunes propietats de la simulació:

Taula 9.1 Propietats de la simulació

Propietat	Valor
<i>Time step (s)</i>	0.00003
Número de <i>time steps</i>	10500
Iteracions màximes	150

El número de *time steps* és suficient per permetre a l'engranatge interior donar 10 voltes i per tant tenir uns resultats estables.

9.2. Resultats obtinguts

De la simulació s'extreuen els següents resultats

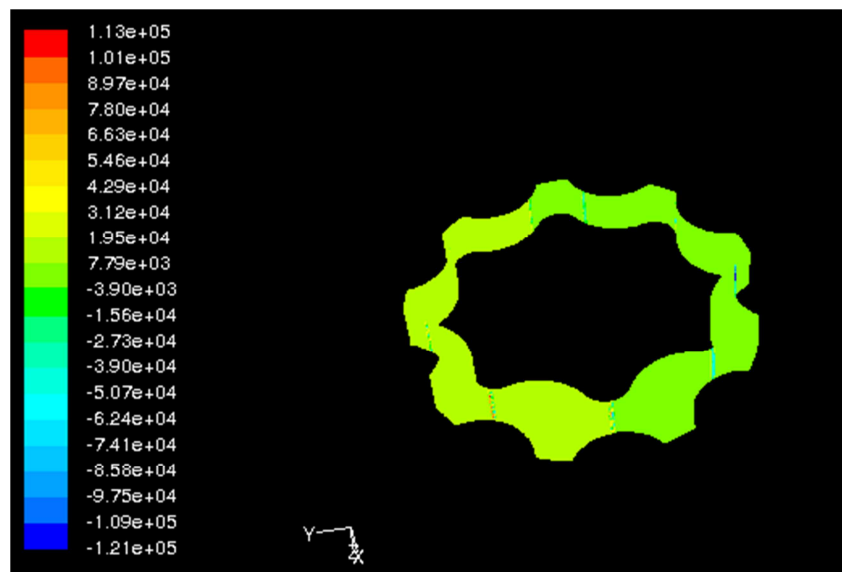


Figura 9.2 Pressió al fluid entre engranatge

A la figura 9.2 es veu un salt de pressions respecte la zona d'entrada de fluid i la zona de sortida com era d'esperar.

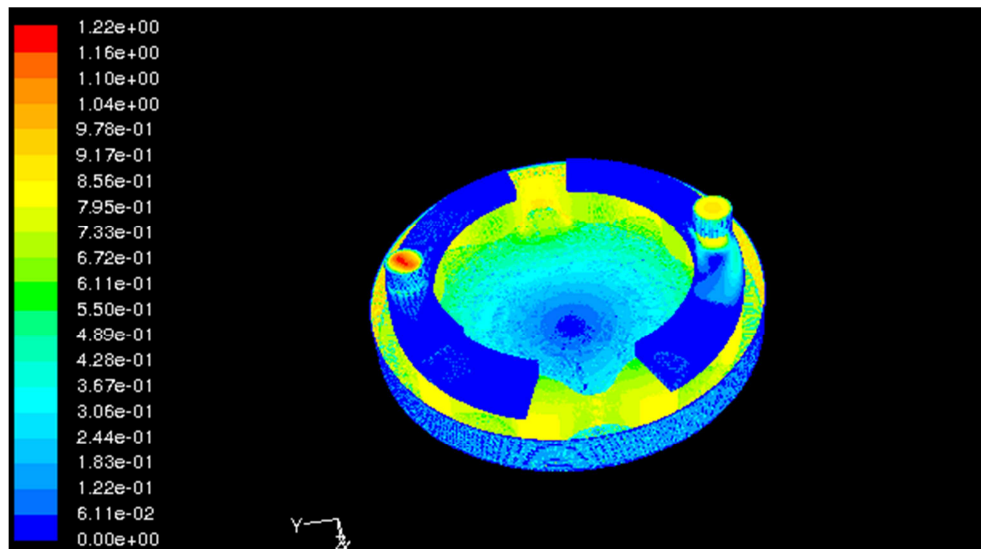


Figura 9.3 Velocitats de tot el fluid

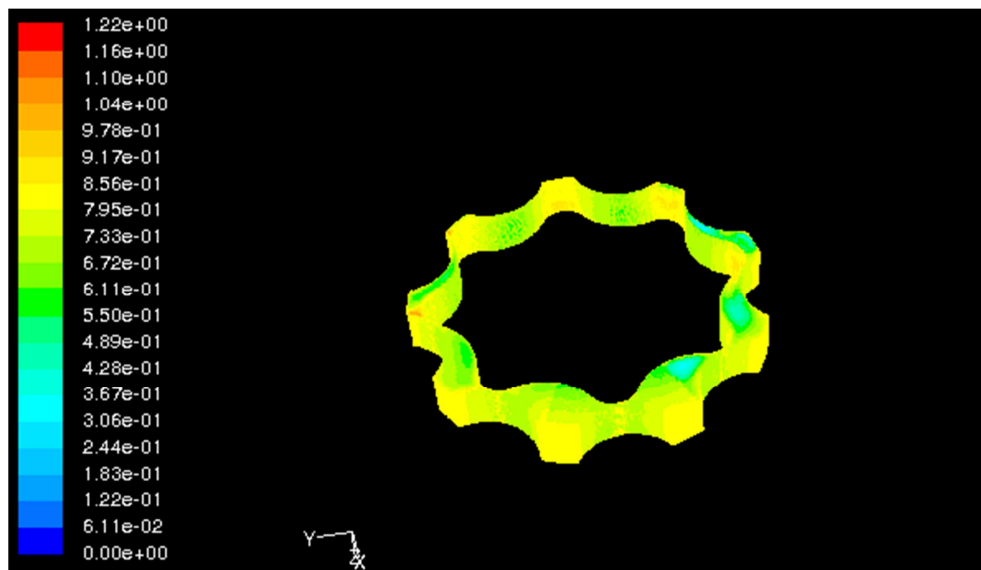


Figura 9.4 Velocitats del fluid entre engranatges

En les figures 9.3 i 9.4 es veu com el fluid que està dins de les lumbreres a penes es mou, però en canvi el fluid que està a les cambres té una velocitat propera a zero excepte a les connexions amb les lumbreres on el fluid canvia de direcció.

A la figura 9.3 es pot veure que flux que hi ha en les cavitats de fugues, pla inferior i anell lateral, és ínfim comparat amb el flux total de la bomba.

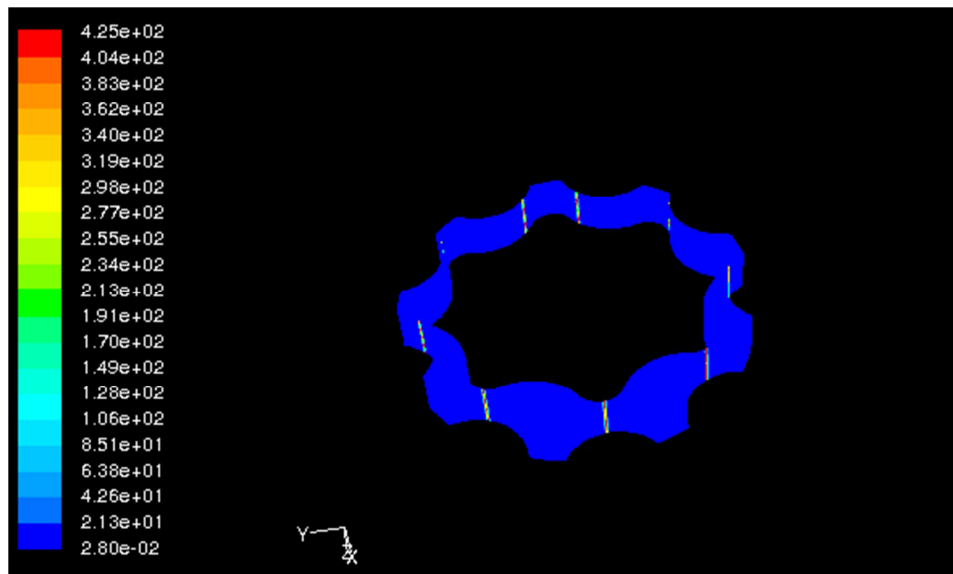


Figura 9.5 Viscositat del fluid

La viscositat del fluid és constant excepte als punts de contacte on la UDF s'encarrega de variar-la per realitzar la separació de les cambres.

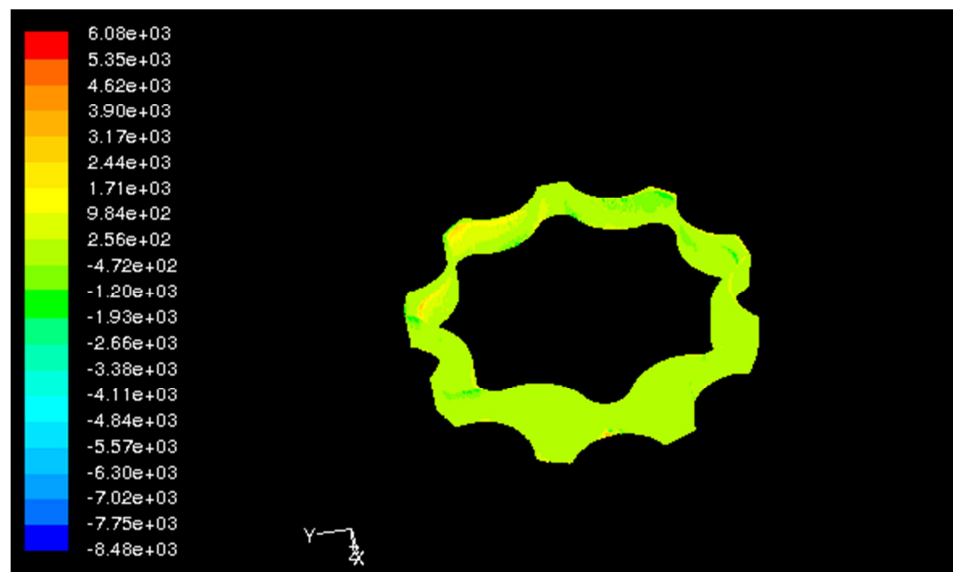


Figura 9.6 Helicity del fluid entre engranatges

La helicitat és una magnitud física associada al flux que mesura en cada punt del mateix la projecció de la vorticitat sobre la velocitat, ja que la combinació d'un gir amb una translació perpendicular a ell genera una hèlix, d'aquí prové el nom.

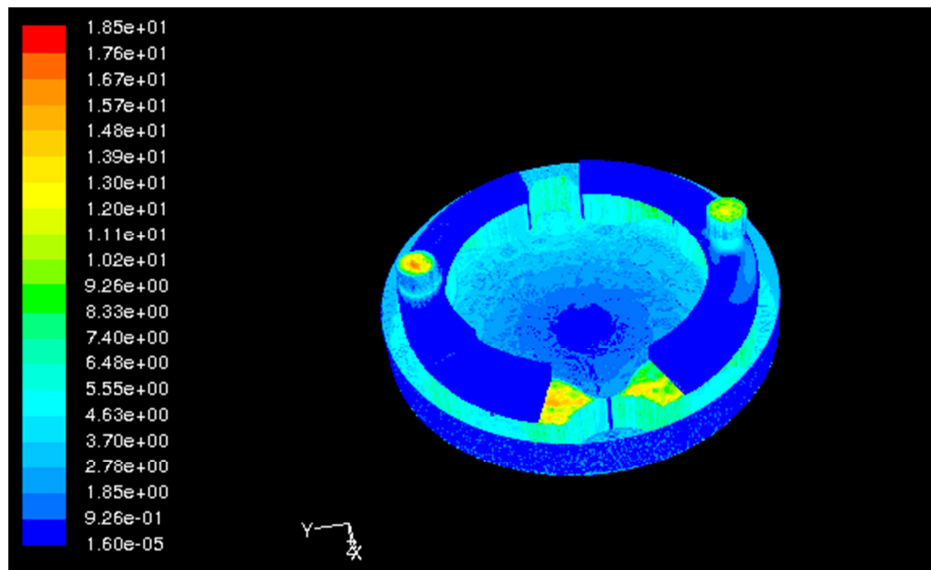


Figura 9.7 Reynolds

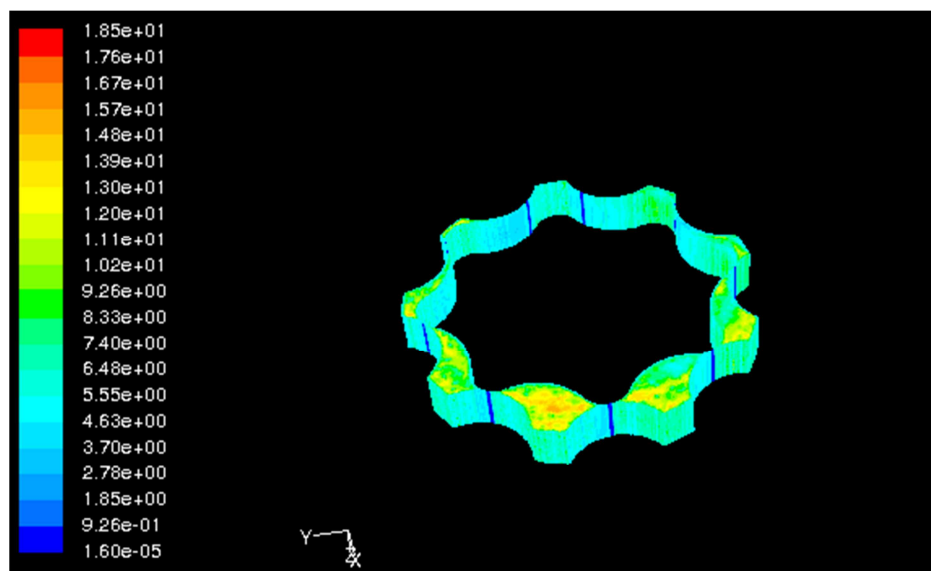


Figura 9.8 Reynolds fluid entre engranatges

La simulació es va realitzar amb un model laminar, per tant, és important comprovar la relació entre els esforços viscosos i convectius o en altres paraules comprovar que el Reynolds està per sota del crític.

9.3. Discussió dels resultats

Per comprovar que la simulació s'ha realitzat correctament s'ha comparat el flux impulsat en la simulació amb el d'altres simulacions anteriors.

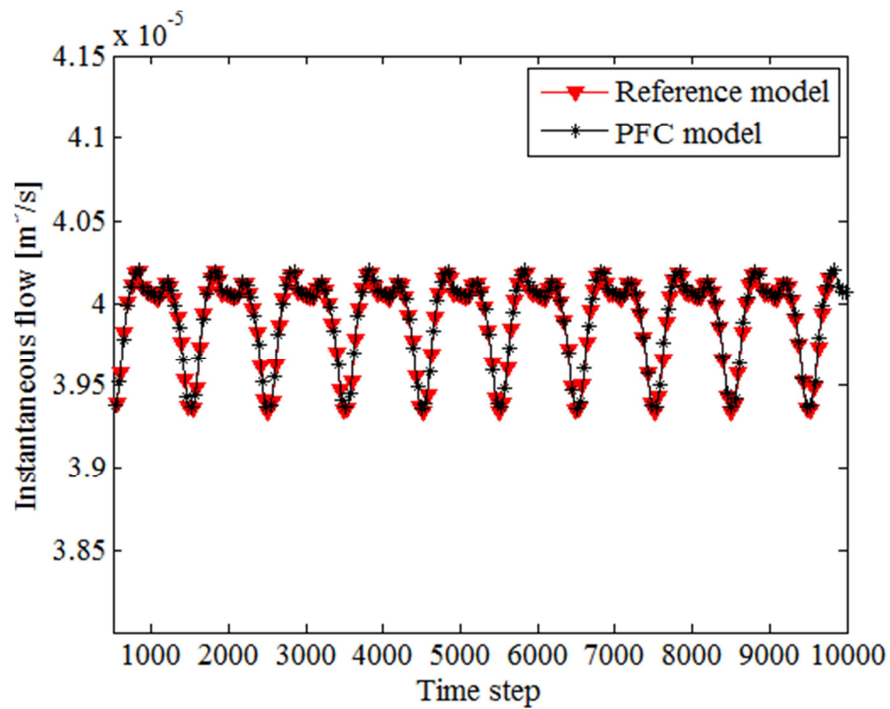


Figura 9.9 Comparació dels fluxos

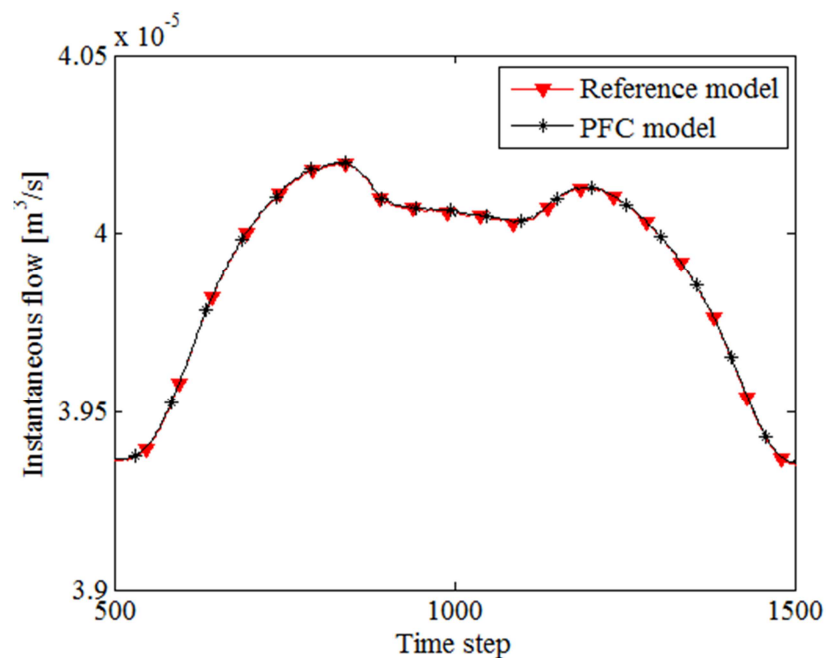


Figura 9.10 Detall d'un cicle

Queda molt clar que el flux impulsat per la bomba és el mateix que l'obtingut per la UDF amb el mètode *Gearing contact point* i per tant es pot afirmar que el nou mètode no només millora el càlcul de la distància si no que no afecta negativament a la simulació.

Una altra comprovació que s'ha realitzat és veure si la distància entre perfils més petita de cada instant de temps es troba en la corba teòrica de punts de contacte.

Si no fos així significaria que el sistema de busqueda del punt de contacte real està situant el punt de contacte en una altra posició en la que no pot estar per definició.

Per obtenir les coordenades dels punts de contacte amb la distància mínima de la simulació es va demanar a la UDF que les guardes en un archiu de text juntament amb la seva distància.

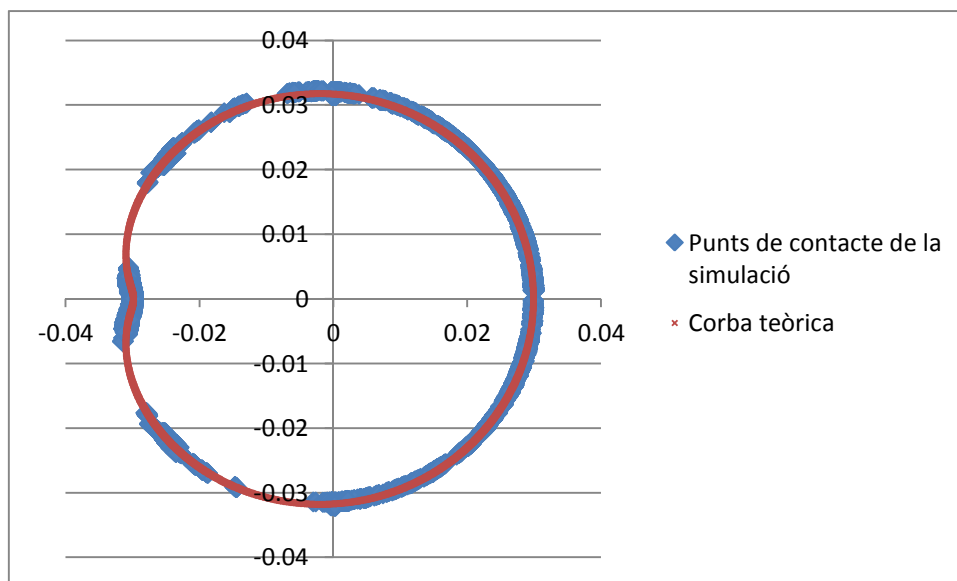


Figura 9.11 Comparació punts de contacte

Com es pot observar a la figura els resultats són magnífics. Tots els punts de contacte real amb la distància mínima per cada instant de temps es troben sobre la corba teòrica.

Un cop s'ha vist que els resultats són correctes es pot analitzar com varia la distància mínima.

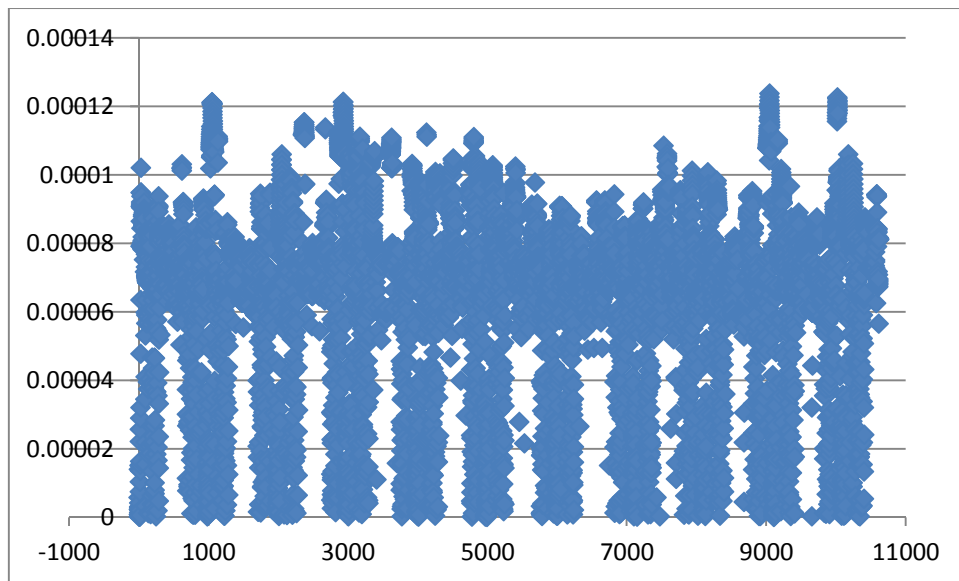


Figura 9.12 Distància mínima

De la figura s'extrau que la major part dels punts de contacte amb distància mínima es mantenen al voltant de la mateixa distància, tot i això es produeixen moments on la distància augmenta o, al voltant de l'instant de temps on es produeix la cambra de volum mínim, la distància cau fins a zero.

10. Nou disseny d'una bomba de metacrilat

El nou disseny de la bomba pretén apropar-se el màxim possible a les bombes més utilitzades en el dia a dia. Aquest nou disseny es fabricarà i utilitzarà per realitzar proves experimentals en futurs treballs.

Per realitzar el disseny s'ha utilitzat el software CATIA v5 ja que l'escola disposa d'una llicència comercial. A més a més és un programa molt intuïtiu i que ofereix un potencial extraordinari.

El fet d'utilitzar CATIA v5 permet crear el negatiu de la bomba, un cop estigui el disseny 3D, que es pot exportar a altres softwares fàcilment per realitzar la malla, per exemple.

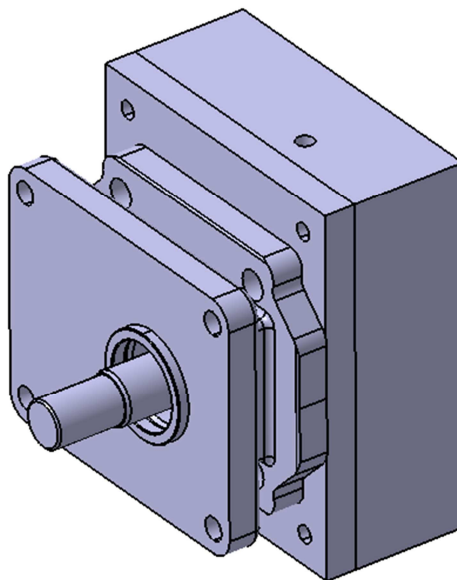


Figura 10.1 Dibuix del nou disseny

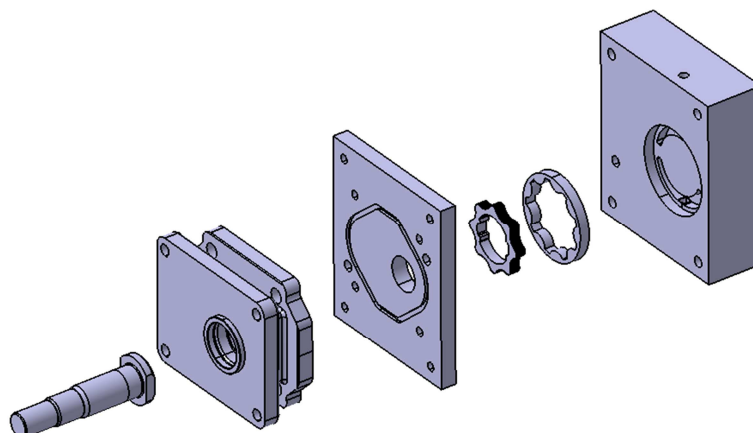


Figura 10.2 Explosió de les peces

La bomba està formada per sis components:

- Carcassa: és la base de la bomba. Té una cavitat on s'allotgen els engranatges i les dues lumbreres. A part té els tubs d'entrada i sortida de fluid mecanitzats.

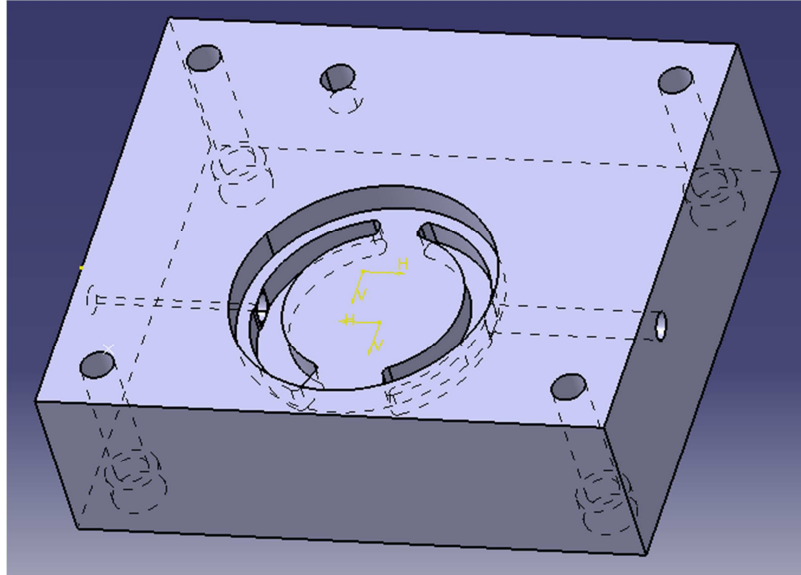


Figura 10.3 Carcassa de la bomba

Els detalls d'aquesta peça es poden observar al plànol 002.

- Coberta: és la tapa que tanca la cavitat de la carcassa. Tan sols té el forat per passar l'eix de l'engranatge interior.

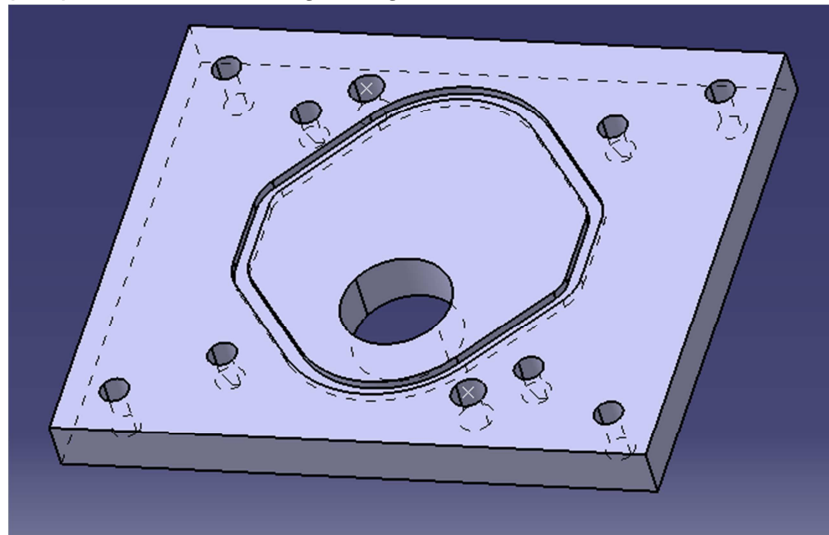


Figura 10.4 coberta

Els detalls d'aquesta peça es poden observar al plànol 001.

- Coberta exterior: és troba sobre la coberta. El seu disseny és més complex que el de la coberta.

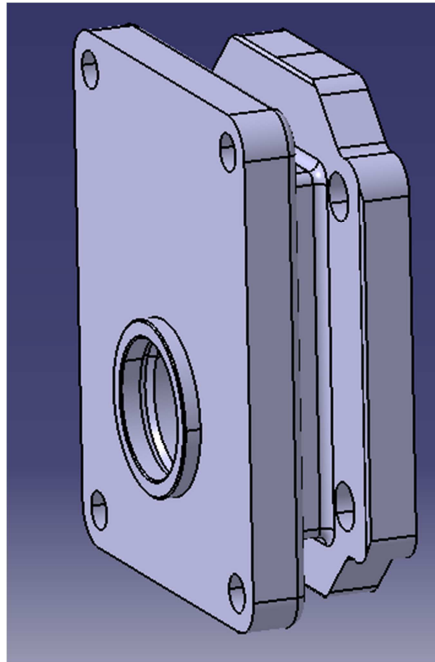


Figura 10.5 Coberta exterior

Els detalls d'aquesta peça es poden observar al plànol 004.

- Eix: Transmet a l'engranatge interior el moviment rotatori del motor.

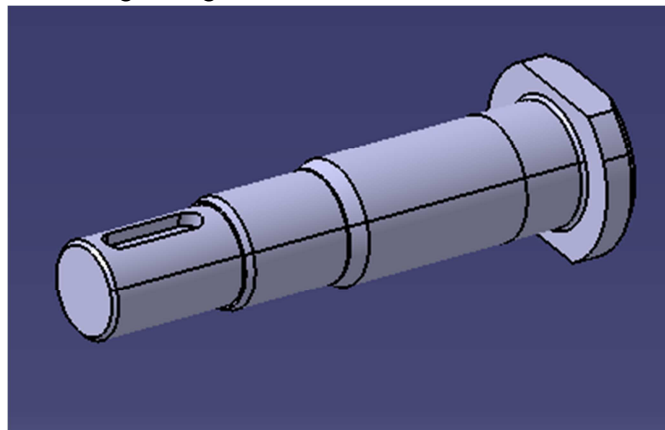


Figura 10.6 Eix

Els detalls d'aquesta peça es poden observar al plànol 003.

- Engranatge exterior: l'engranatge es troba dins la cavitat de la carcassa.

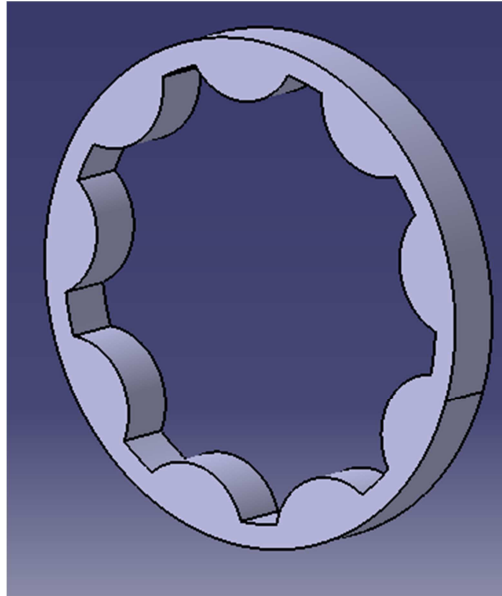


Figura 10.7 Engranatge exterior

- Engranatge interior: Es troba dins la cavitat de la carcassa i dins l'engranatge exterior. Rep el moviment de rotació de l'eix.

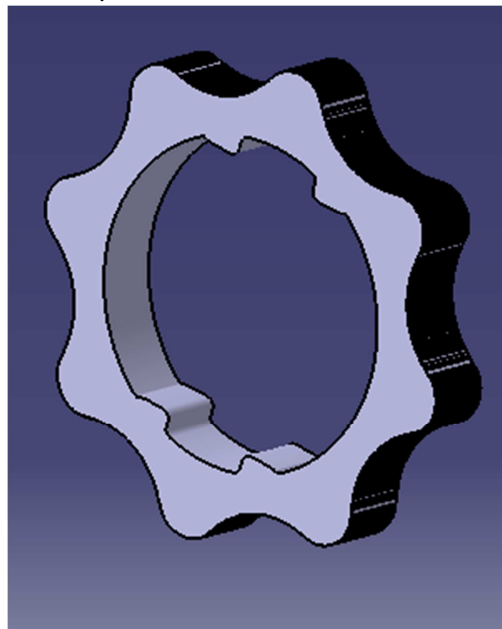


Figura 10.8 Engranatge interior

Una de les característiques destacables d'aquest disseny és el lloc de connexió entre els tubs d'entrada i sortida, que estan mecanitzats a la carcassa, i les lumbreres. En altres dissenys, i l'utilitzat fins ara, la connexió es produeix per la zona superior de les lumbreres creant fins i tot unes lumbreres superiors.

En aquest disseny es suprimeixen les lumbreres superiors ja que ja no són necessàries al produir-se la connexió pel lateral de les lumbreres.

El fet que la connexió sigui pel lateral ha implicat augmentar la profunditat de les lumbreres fins al diàmetre dels tubs ja que si no les lumbreres tenien una profunditat inferior al diàmetre dels tubs i per tant no es produïa una unió completa.

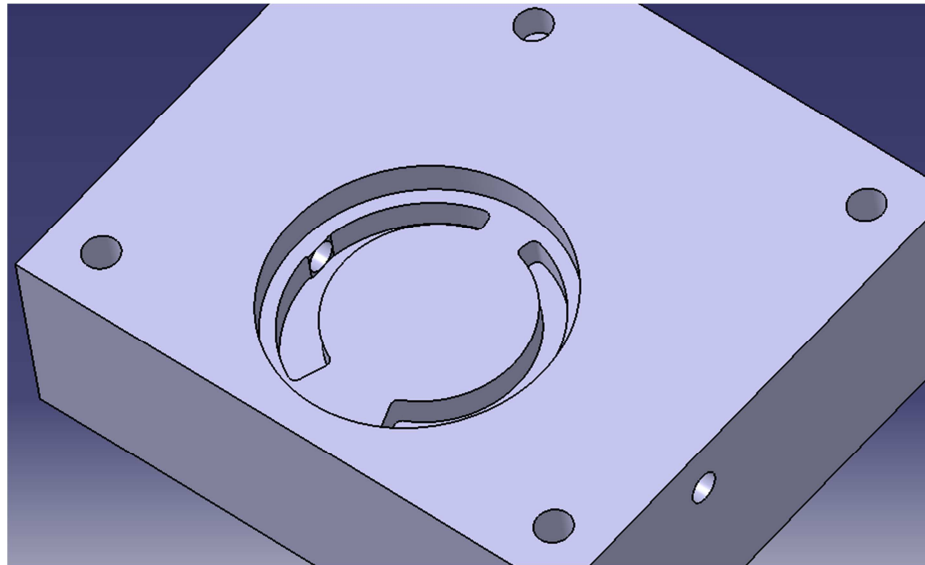


Figura 10.9 Connexió lateral

El perfil de les lumbreres també a patit un canvi degut a la variació de la connexió amb les canalitzacions d'entrada i sortida. Amb l'objectiu de reduir la dificultat a l'hora de realitzar el muntatge la unió entre el tub i el perfil de la lumbrera és una pla i no una corba. D'aquesta manera es redueix àmpliament la dificultat, però no s'afecta al comportament del fluid ja que és un canvi gaire bé inapreciable.

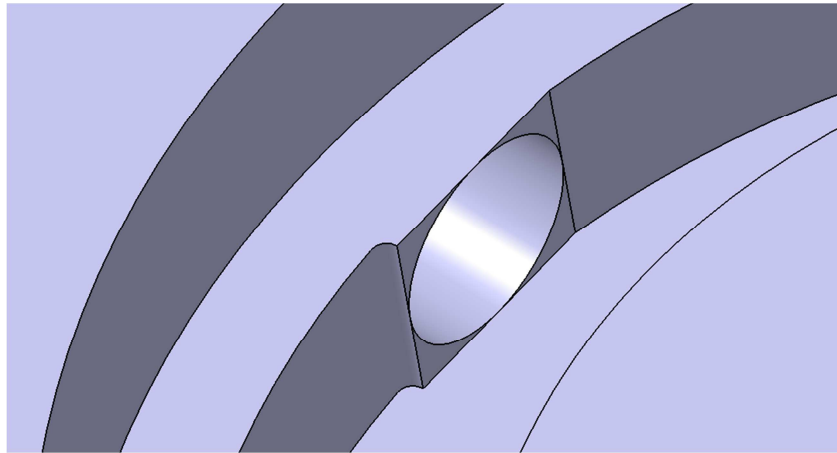


Figura 10.10 Pla de connexió

Donat que es vol una malla capaç de funcionar amb les simulacions realitzades fins ara trona a ser necessari augmentar el diàmetre de l'engranatge exterior.

A part per apropar les simulacions a la realitat s'ha afegit un espai entre els engranatges i la carcassa. Per tant, per simular les pèrdues i les toleràncies de fabricació els engranatges estan separats tant de la carcassa com de la tapa 125 μm i el diàmetre de l'engranatge exterior és 40 μm inferior al de la cavitat de la carcassa.

Amb aquesta nova separació s'ha arribat a un disseny molt proper a la realitat ja que en les bombes reals es poden produir fuites per qualsevol zona entre els engranatges.

11. Mallat del nou disseny

A partir del model CAD 3D s'ha realitzat una malla que es pugui utilitzar com a base per desenvolupar una nova malla que permeti comparar els resultats experimentals del nou disseny un cop fabricat amb simulacions.

Per importar la geometria a ICEM 14.5 abans s'ha de crear la geometria de fluid. Per fer-ho CATIA v5 ofereix la possibilitat d'operar amb volums, per exemple restar un volum cilíndric a un altre rectangular de tal forma que aquest últim quedi amb un buit cilíndric en el seu interior sempre i quan s'interceptin els volums.

Per tant es va crear un volum prismàtic rectangular uns mil·límetres més petit que la carcassa i es va procedir a restar totes les parts de la bomba.

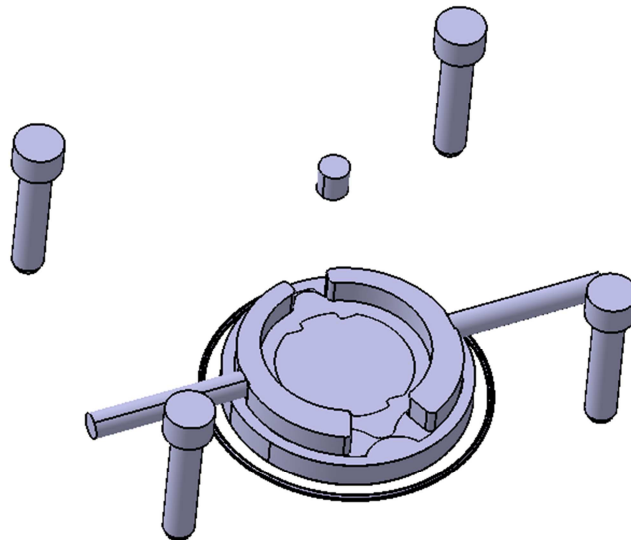


Figura 11.1 Negatiu de la bomba

Com es pot observar en la figura anterior els forats pels cargols i altres buit de la bomba queden com volums i per tant s'han eliminat per obtenir el negatiu final de la bomba.

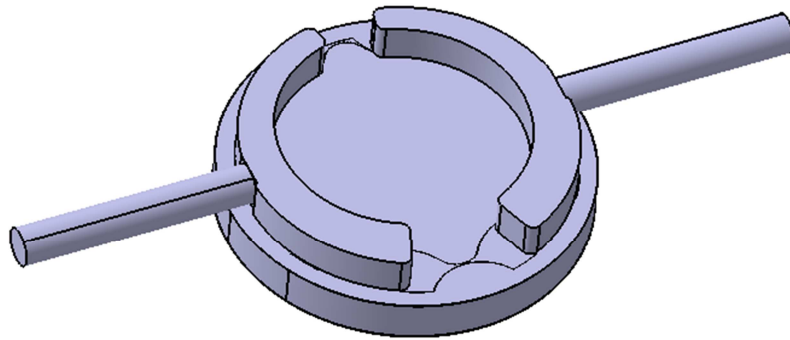


Figura 11.2 Negatiu final de la bomba

La malla realitzada ha estat una malla estructurada 2.5 D en tot el volum de fluid per tal d'agilitzar les simulacions i s'han retirat els engranatges. La manca d'engranatges obliga a canviar les condicions de contorn de l'entrada ja que al no haver engranatges no es força al fluid a circular.

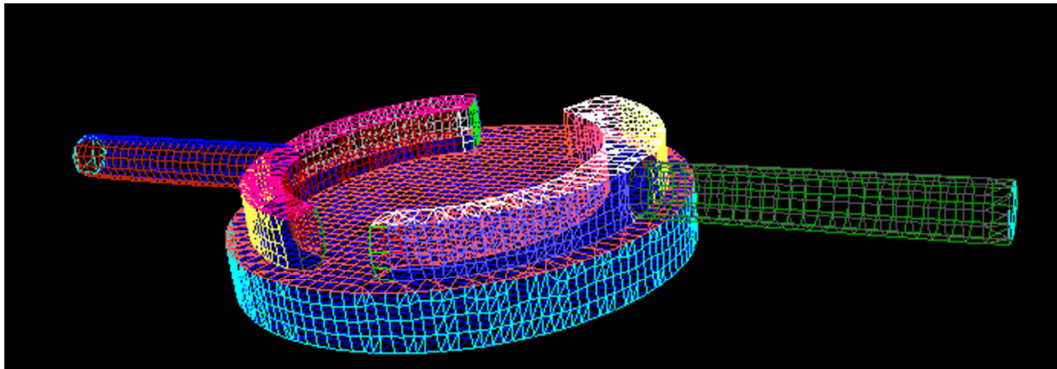


Figura 11.3 Mallat

En la imatge es pot observar el mallat. Les cel·les d'aquest mallat són majoritàriament primes rectangulars.

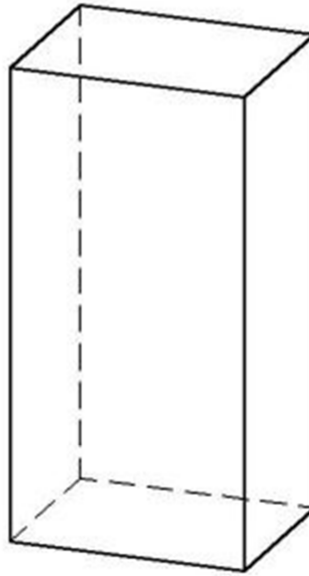


Figura 11.4 Cel·la tipus

La malla es pot separar en tres zones:

- Tubs d'entrada i sortida: Van des de l'entrada fins la lumbrera d'entrada o des de la lumbrera de sortida fins la sortida.

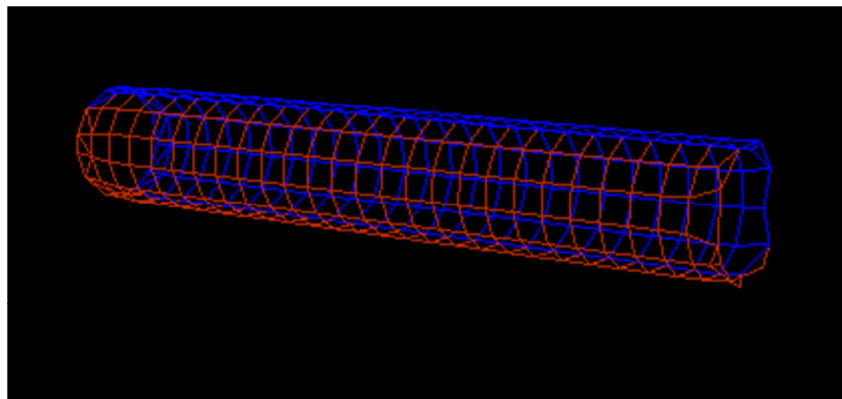


Figura 11.5 Malla del tub d'entrada

- Lumbres: Reben el fluid del tub d'entrada o el canalitzen cap a la sortida. Connecten l'entrada amb la cavitat on serien els engranatges.

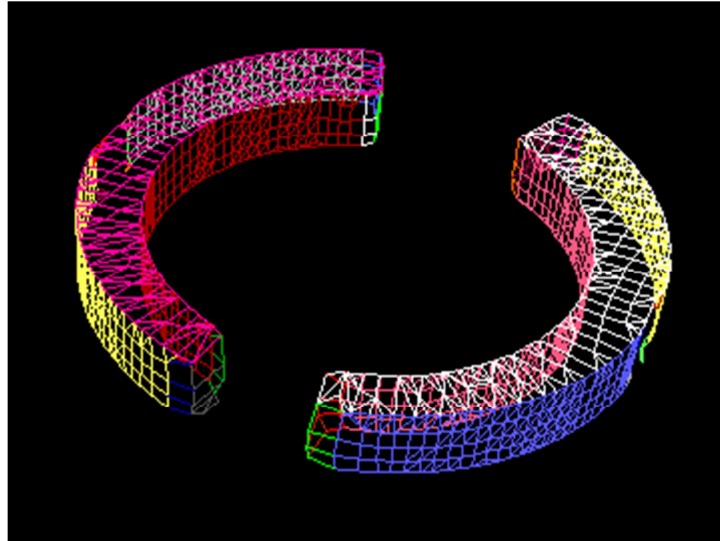


Figura 11.6 Mallat de les lumbres

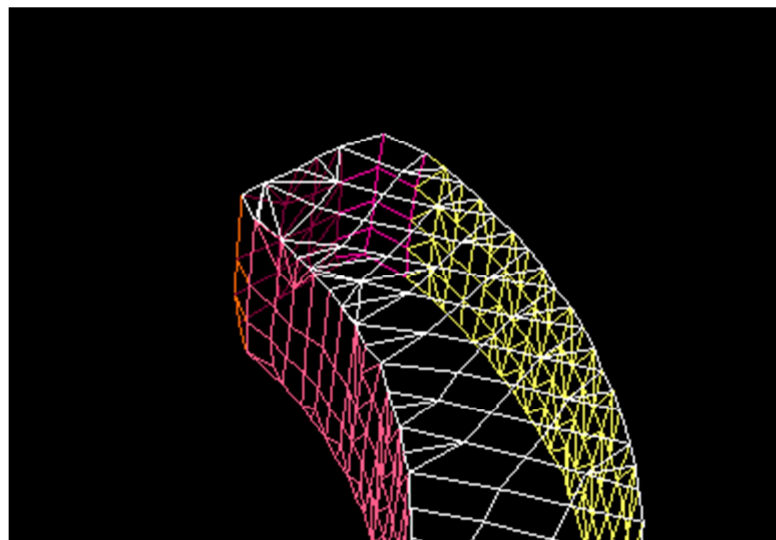


Figura 11.7 Detall zona superior lumbrera de sortida

- Cavitat: Cambra on estarien els engranatges si formessin part de la malla.

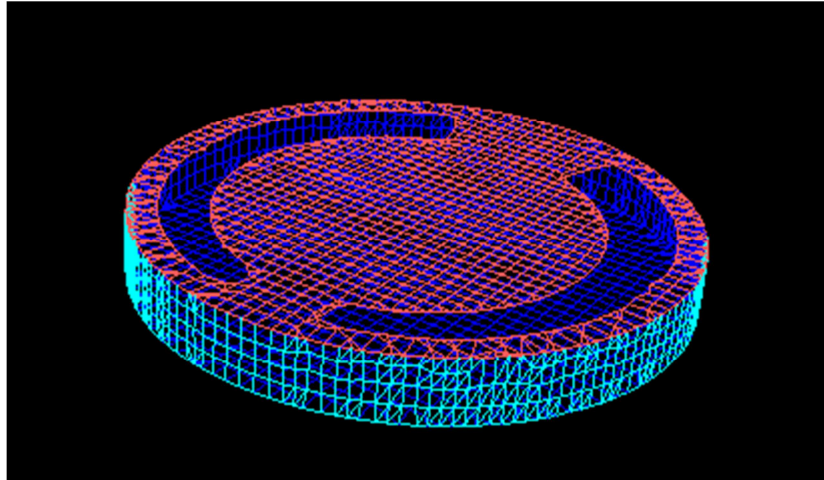


Figura 11.8 Mallat de la cavitat

S'ha realitzat una petita simulació estàtica per comprovar que la malla fos correcta. Com ja s'ha comentat les condicions de l'entrada de fluid s'han tingut que canviar per una *velocity-inlet* o el que és el mateix una velocitat entrant d'un m/s.

A continuació es presenten els resultats obtinguts de la simulació.

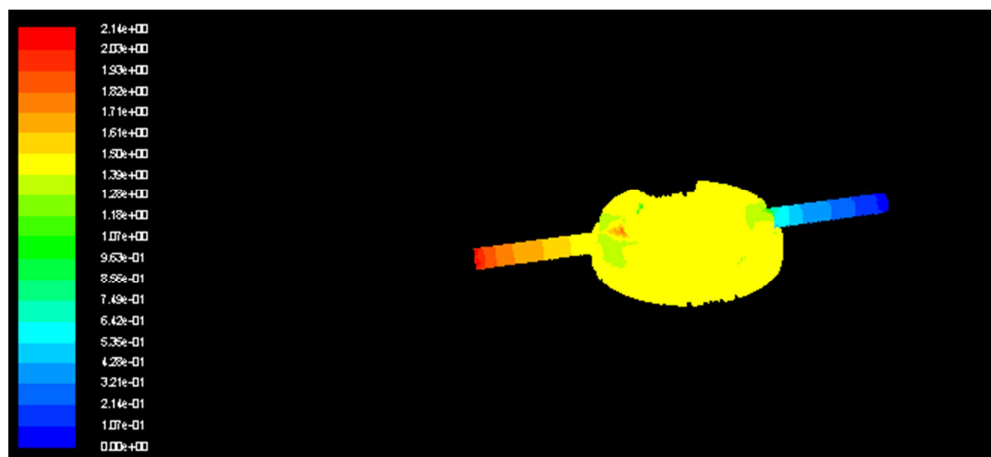


Figura 11.9 Pressió

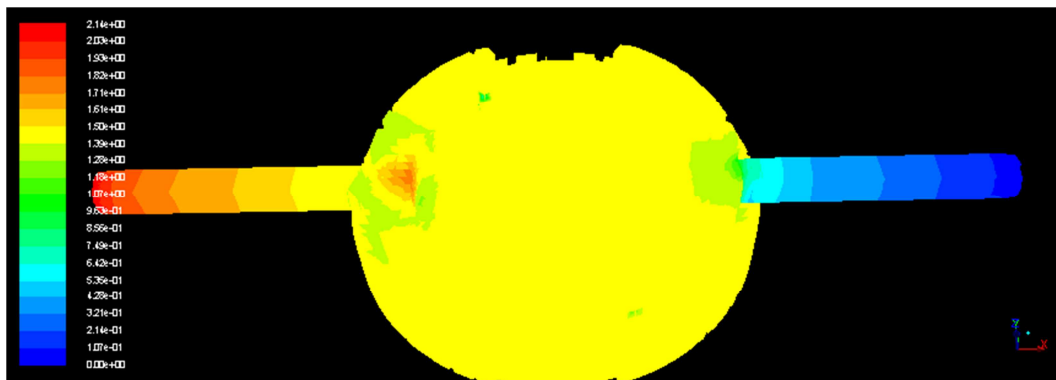


Figura 11.10 Detall pressió

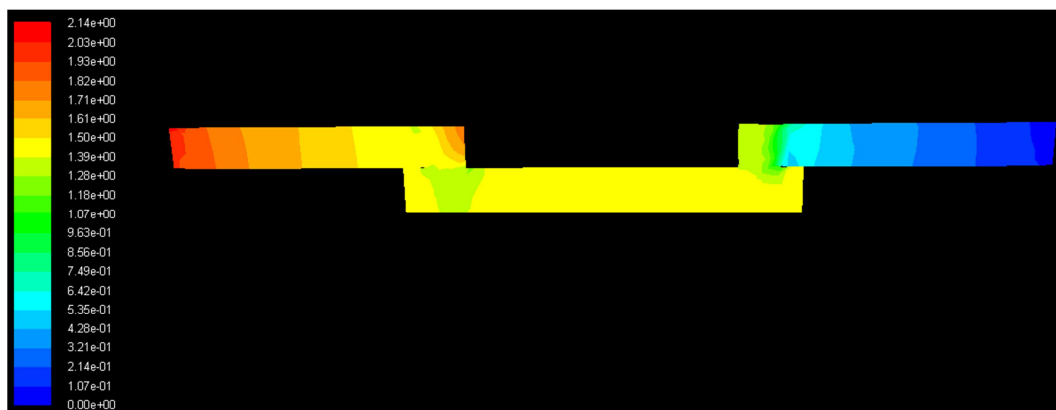


Figura 11.11 Tall pla axial dels tubs pressió

Es pot veure com en l'entrada de fluid a la cavitat hi ha un petit augment de la pressió degut al xoc del fluid amb la paret de la lumbrera. Aquest efecte es torna a repetir a l'altra lumbrera però a la superfície superior.

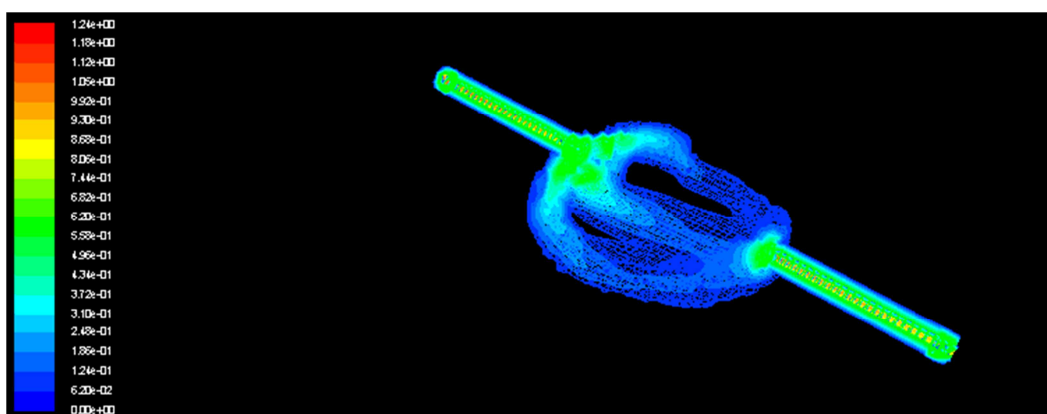


Figura 11.12 Mòdul de la velocitat

En la figura anterior del mòdul de la velocitat es veu encara més clar que abans la trajectòria del fluid dins la bomba. Un cop ha entrat a la lumbrera el fluid es reparteix en tres branques, una cap a cada costat i l'altre gira cap a la cavitat.

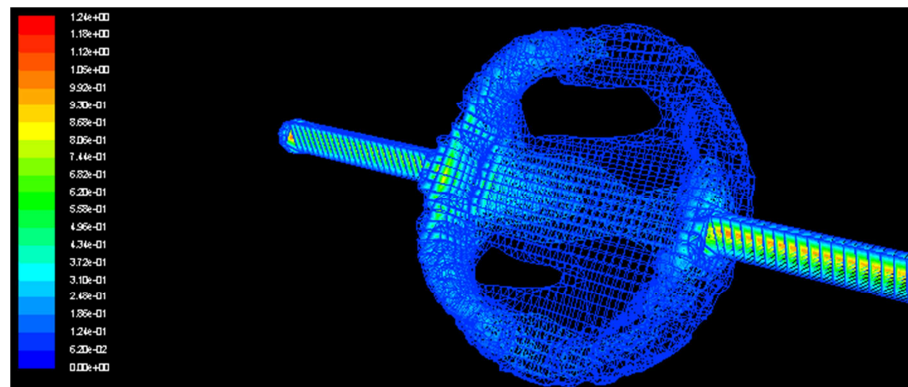


Figura 11.13 Tres camins del fluid

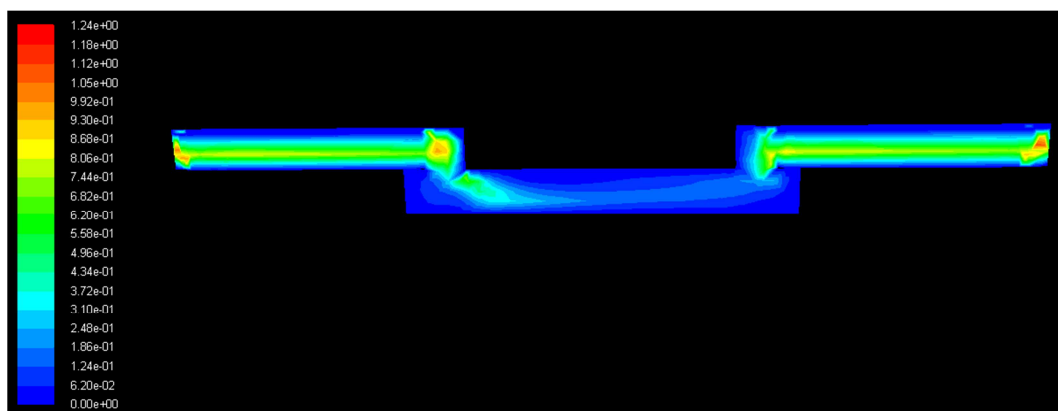


Figura 11.14 Tall pel pla axial dels tubs velocitat

En la figura 11.14 es pot veure com el fluid té una velocitat alta quan es troba amb la paret de la lumbrera i es separa cap a les direccions normals al pla axial dels tubs. També es pot veure el camí central que agafa part del fluid.

Es raonable que es formin aquest tres camins donada la forma de la lumbrera i el fet que l'entrada es connecti a la meitat d'aquesta es crea la tendència de separar-se cap als costats al fluid. La tercera via és el camí senzill pel fluid.

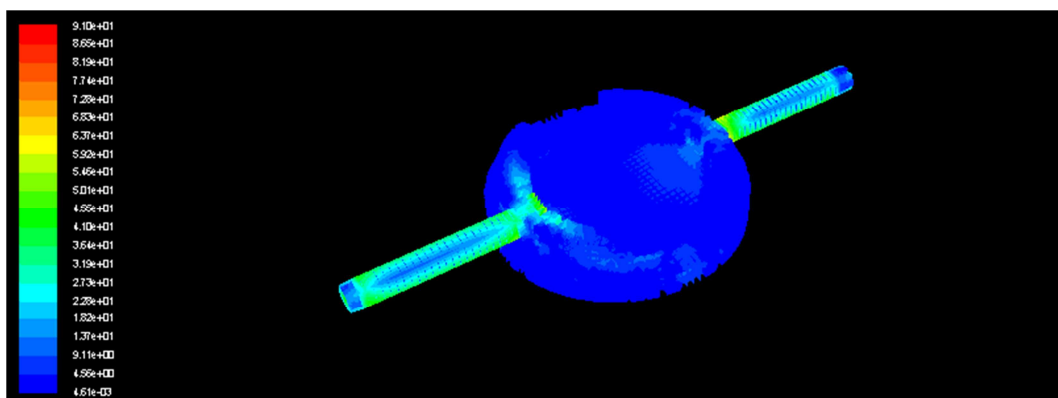


Figura 11.15 Nombre de Reynolds

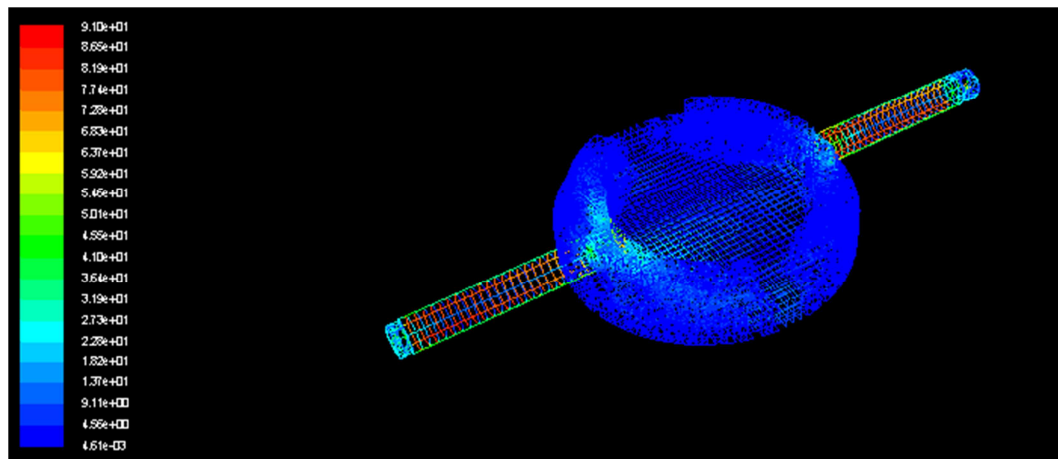


Figura 11.16 Nombre de Reynolds

En les dues figures anteriors es pot veure que el Reynolds màxim es produeix dins els tubs i el seu valor és 91.

12. Medi ambient

Al tractar-se d'un projecte teòric sobre les simulacions computacionals l'impacte ambiental del projecte és molt reduït.

Aquest impacte es pot observar en les diferents fases del projecte.

- Fase de concepció:
Durant la recerca d'estudis previs es van utilitzar còpies digitals de les revistes i tan sols es va utilitzar un projecte previ en forma física que va posar a disposició el departament de mecànica de fluids. D'aquesta manera el consum energètic es redueix al produït per l'ordinador i l'impacte ambiental és mínim.
També s'ha de tenir en compte que es va decidir partir d'una base per la UDF reduït el temps necessari per desenvolupar-la.
El desenvolupament de la UDF s'ha dut a terme en format digital evitant el màxim possible l'ús del format físic i el major consum energètic que s'ha donat ha estat durant la simulació que requereix una gran quantitat de temps.
- Fase de redacció:
La redacció del projecte s'ha efectuat completament en format digital. En cas de necessitar realitzar alguna anotació es va efectuar en fulls reutilitzats o en format digital.
- Fase de construcció:
A l'abast del projecte no entra la construcció d'una bomba i per tant l'impacte d'aquesta fase és nul.
- Fase de desmantellament:
Els únics productes físics produïts en aquest projecte han estat la còpia física entregada a la universitat així com el CD amb una còpia digital i la capsa de cartró on van tots dos.
En la còpia física s'ha reduït l'ús de plàstics a una tapa transparent i una opaca reciclables. L'anella de l'enquadernació és també reciclables així com els fulls.
El CD amb la còpia digital es portarà al centre de reciclatge més proper un cop la seva vida útil acabi.

A part d'aquestes mesures per les diferents fases, hi ha certs materials que es tractaran de la següent forma:

- Les restes de paper es dipositaran al contenidor blau i es gestionaran mitjançant els serveis municipals de recollida d'escombraries.
- Les restes de plàstics i envasos es dipositaran al contenidor groc i es gestionaran mitjançant els serveis municipals de recollida d'escombraries.
- El tòner de la impressora es dipositarà en el contenidor específic de l'escola ETSEIAT que després serà recollit per l'empresa pertinent.

13. Treballs futurs

Com ja s'ha vist, aquest projecte i en concret la UDF desenvolupada en ell obre la porta a nous treballs que podran evolucionar el programa cap a un major realisme en el moviment dels engranatges.

A partir d'aquestes futures simulacions es podran realitzar millors recerques en aspectes molt dispars a aquest projecte com per exemple els soroll que es produeixen quan la bomba es troba en funcionament.

A més el nou disseny és més proper a les bombes utilitzades comunament i el nou mallat crea una base sobre la que treballar cap a una malla que ofereixi uns resultats més acurats a la vegada que agilitza el càlcul.

Com base de treball es proporciona el pseudocodi de la UDF capaç de moure els engranatges en funció del punt de contacte.

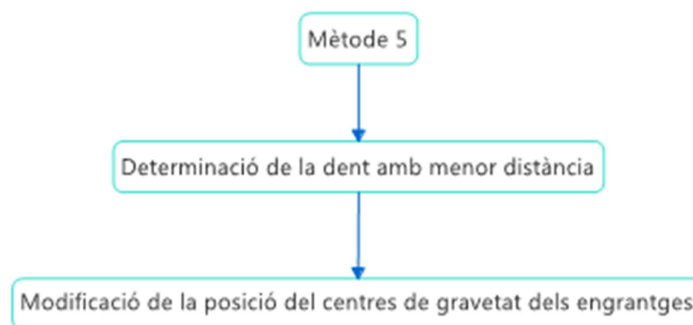


Figura 13.1 Pseudocodi futura UDF

La determinació de quina és la dent on es produeix la menor distància és necessària ja que serà sobre aquest punt sobre el que es produirà la rotació i per tant s'ha de modificar la posició dels centres de gravetat dels engranatges per ajustar-se al moviment de rotació.

El mètode de determinació les distàncies és la mateixa que la desenvolupada durant aquest estudi.

14. Conclusions

Durant el projecte s'han anat complint amb els objectius establerts al inici.

La UDF⁵ desenvolupada aconsegueix trobar el punt de contacte real de la simulació, que considera una tolerància de fabricació, així com modificar la viscositat de les cel·les, pas necessari pel correcte funcionament de la simulació, augmentant així el realisme de les simulacions allunyant-nos de l'idealisme.

Una altre propietat de la UDF és la seva capacitat de guardar en arxius de text la distància mínima així com les coordenades del punt de contacte de cada instant de temps.

Com s'ha vist els punts de contacte trobats es troben sobre la corba teòrica fet que demostra la precisió del mètode desenvolupat i la seva capacitat d'operació.

A més a més el registre realitzat sobre l'evolució del projecte, concretament els mètodes que no es van poder desenvolupar correctament, podrà ser d'ajuda per altres estudis que s'estalviaran una pèrdua de temps i esforços intentant sistemes que aquí s'ha demostrat que no són viables o fins i tot possibles.

El nou disseny 3D de la bomba gerotor que s'ha realitzat en CATIA v5 permetrà fabricar una bomba que serveixi per proves experimentals. També aquest disseny és més proper a les bombes comercials que l'anterior.

A partir del nou disseny 3D s'ha realitzat una malla que juntament amb el la UDF tots tres objectius són els fonaments de futurs estudis que es desenvoluparan en el departament i que s'aproparan cada cop més a un model el més realista possible que es podrà comprovar amb proves experimentals.

Tot i ser d'una senzillesa considerable el mallat s'ha pogut simular amb Fluent obtenint uns resultats satisfactoris sobretot tenint en compte que l'objectiu de la malla no era aconseguir uns grans resultats si no aconseguir realitzar una simulació.

De cara a futurs estudis no només s'ha proporcionat una UDF, un disseny 3D i el seu mallat si no que també s'ha desenvolupat el pseudocodi de la nova UDF que permetrà millorar la simulació referent al moviment dels engranatges.

A part el projecte ha permès a l'autor ampliar el seus coneixements sobre les simulacions CFD i sobre la mecànica de fluids. Cal donar una importància especial als coneixements sobre CFD ja que no és una matèria que es tracti

⁵ UDF: User-Defined Function, veure apartat 8 per més detalls.

durant els estudis troncats i tan sols es veu de forma molt superficial en una optativa de l'especialitat mecànica. La importància de les simulacions CFD es cada dia més important degut a la seva presència en qualsevol disseny de sistemes fluid-dinàmics.

També s'han pogut posar en pràctica coneixements que s'havien adquirit durant els estudis, com programació en C o la realització d'un projecte.

15. Planning

Durant tot el desenvolupament del projecte s'han fet anotacions de la carrega de temps en hores que ha suposat cada tasca.

Taula 15.1 Planning

		Tasques (h)															
		Estat de l'art	Tutorials fluent	Estudi UDF base	Mètode 1	Mètode 2 i 3	Mètode 4	Mètode 5	Simulació de test	Simulació departament	Nou disseny	Mallat	Redactar	Impressió i enquadernació	Total		
Setmanes	23/12-5/01	6.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.00		
	6/01-12/01	6.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.00		
	13/01-19/01	0.00	5.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.00		
	20/01-26/01	0.00	20.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	20.00		
	27/01-2/02	11.00	10.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.00	0.00	26.00		
	3/02-9/02	11.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.00	0.00	21.00		
	10/02-16/02	3.00	0.00	6.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	9.00		
	17/02-23/02	2.00	0.00	12.00	15.00	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	31.00		
	24/02-02/03	2.00	0.00	0.00	0.00	17.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	19.00		
	03/03-09/03	0.00	0.00	0.00	0.00	23.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	23.00		
	10/03-16/03	0.00	0.00	0.00	0.00	6.00	10.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	16.00		
	17/03-23/03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	15.00	10.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	25.00		
	24/03-30/03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.00	24.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	29.00		
	31/03-06/04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	72.00	0.00	0.00	2.00	0.00	0.00	74.00		
	07/04-13/04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	168.00	0.00	0.00	18.00	0.00	0.00	186.00		
	14/04-20/04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	168.00	0.00	0.00	22.00	0.00	0.00	190.00		
	21/04-27/04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	22.00	0.00	0.00	22.00		
	28/04-04/05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	22.00	0.00	0.00	22.00		
	05/05-11/05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	21.00	0.00	0.00	21.00		
	12/05-18/05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.00	0.00	20.00	0.00	0.00	22.00		
	19/05-25/05	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.00	0.00	19.00	0.00	0.00	23.50		
	26/05-01/06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.00	7.00	21.00	0.00	0.00	38.00		
	02/06-06/06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.00	28.00	2.00	0.00	40.00		
	Total	41.50	35.00	18.00	15.00	48.00	25.00	15.00	24.00	408.00	16.00	17.00	210.00	2.00	442.50		

A continuació es presenta el diagrama de Gantt que es va utilitzar durant el projecte:

Taula 15.2 Dates de les tasques

Nombre de tarea	Duración	Comienzo	Fin
Estat de l'art	50 días	lun 23/12/13	vie 28/02/14
Tutorials fluent	19 días	mié 08/01/14	dom 02/02/14
Redacció estat de l'art	11 días	lun 27/01/14	dom 09/02/14
Estudi UDF base	6 días	lun 10/02/14	dom 16/02/14
Mètode 1	5 días	lun 17/02/14	vie 21/02/14
Mètode 2 i 3	16 días	vie 21/02/14	vie 14/03/14
Mètode 4	6 días	vie 14/03/14	vie 21/03/14
Mètode 5	7 días	vie 21/03/14	dom 30/03/14
Simulació de test	4 días	dom 30/03/14	mié 02/04/14
Simulació instal·lacions departament	12 días	vie 04/04/14	dom 20/04/14
Redactar	44 días	lun 07/04/14	jue 05/06/14
Nou disseny	16 días	lun 12/05/14	dom 01/06/14
Mallat	8 días	lun 26/05/14	mié 04/06/14
Impressió i enquadernar	3 días	mié 04/06/14	vie 06/06/14

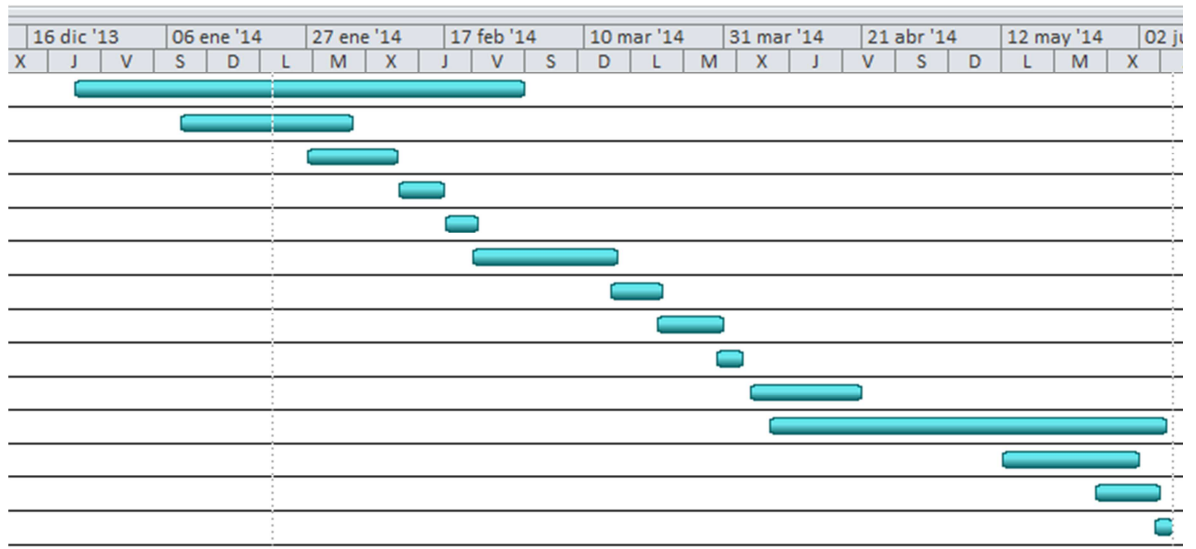


Figura 15.1 Diagrama de Gantt

16. Nomenclatura

CFD	mecànica de fluids computacional
UDF	User-Defined Function
ANSYS Fluent	Codi comercial de CFD
ETSEIAT	Escola Tècnica Superior d'Enginyers Industrials i Aeronàutics de Terrassa
CATIA v5	Software comercial de disseny 3D
ICEM CFD 14.5	Software comercial de mallat
Gràfics de Bond/Bond Graph	tècnica gràfica explícita utilitzada per representar sistemes físics
PIV	Particle Image Velocimetry
μ PIV	microParticle Image Velocimetry
Stereo μ PIV	Stereo microParticle Image Velocimetry
Z	Número de dents de l'engranatge exterior
x_{pc}	Coord. X del punt de contacte teòric
α_{pc}	Angle del punt de contacte teòric
R_2	Radi de la corba al centre del dent de l'engranatge exterior
S	Radi del perfil de la dent de l'engranatge exterior
r_2	Radi del cercle de pas de l'engranatge exterior
y_{pc}	Coord. Y del punt de contacte teòric
j	Dent de l'engranatge exterior
ω_{ext}	Velocitat angular de l'engranatge exterior
t	Temps
O ₂	Centre de l'engranatge exterior
P ₁	Punt entre el peu de la dent de l'engranatge interior i la dent de l'engranatge exterior
G	Radi peu dents engranatge exterior
e	Excentricitat
solver	Algoritme solucionador

debugger	Software corrector del codi
ω_{int}	Velocitat angular de l'engranatge interior
O_1	Centre de l'engranatge interior
d_{max}	Distància de referència
$\mu_{\text{cel·la}}$	Viscositat de la cel·la
μ_{max}	Viscositat màxima
μ_{oli}	Viscositat de l'oli
d	Distància
pseudocodi	Algoritme del codi
<i>thread</i>	Grup d'elements
D	Distància
x_A	Coordenada x del punt
y_A	Coordenada y del punt
a	Pendent de la recta
b	Tall de les ordenades de la recta

17. Bibliografia

[1] H Ding, X J Lu, B Jiang. A CFD model for orbital gerotor motor. *IOPSCIENCE*. 2012, vol. 15, part 6.

[2] P J Gamez-Montero, E Codina. Flow characteristics of a trochoidal-gear pump using bond graphs and experimental measurement. EN: C R Burrows. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*. 2012.

[3] P.J. Gamez-Montero, R. Castilla, M. Khamashta, E. Codina. Contact problems of a trochoidal-gear pump. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2006, vol. 48, p. 1471–1480.

[4] Giovanni Bonandrini, Giovanni Mimmi, Carlo Rottenbacher. Design and simulation of meshing of a particular internal rotary pump. *Mechanism and Machine Theory*. 2012, vol. 49, p. 104-116.

[5] Lozica Ivanovic, Danica Josifovic, Andreja Ilic. Modelling of Trochoidal Gearing at the Gerotor Pump. *Mechanisms and Machine Science*. 2012, vol. 13, p. 553-563.

[6] Gabriela Juarez-Martinez. Micro/Nano Flow Characterization Techniques. *Encyclopedia of Nanotechnology*. 2012, p. 1336-1382.

ANSYS FLUENT 12.0 UDF Manual. 2009.

ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide. 2009.

ANSYS ICEM CFD Help Manual. 2012.

H. Versteeg, W. Malalasekera. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. 2º ed. 2007. ISBN 9780131274983.

Eduardo Torrecilla Insagurbe. *El Gran Libro de CATIA*. 1º ed. 2010. ISBN 8426716636.

18. Plec de condicions

El projecte ha estat desenvolupat amb els sistemes operatius Ubuntu i Windows 7. Es disposa de llicència Windows 7 Home premium de Microsoft Corporation. El sistema operatiu Ubuntu és de lliure utilització i s'ha utilitzat una versió gratuïta proporcionada per Canonical Ltd.

Dins aquest sistema s'han utilitzat diferents softwares:

- ANSYS Fluent: es disposa d'una llicència d'estudiants a l'escola amb la que s'ha treballat. A més es disposa d'una llicència comercial amb la que s'ha realitzat la simulació.
Aquesta llicència dona accés tant al software com a tota la documentació.
- ICEM CFD: es disposa d'una llicència d'estudiants a l'escola amb la que s'ha treballat.
Aquesta llicència dona accés tant al software com a tota la documentació.
- CATIA v5: es disposa d'una llicència a l'escola amb la que s'ha treballat.

L'ús d'aquest softwares s'ha fet mitjançant indicacions dels fabricants i en cap moment s'han desobeït les condicions d'ús.

19. Pressupost

Per analitzar el cost que ha suposat aquest projecte s'han dividit les tasques realitzades pel personal que les ha efectuat i s'ha estimat el cost per cada hora de cada membre. El projecte ha estat format per un estudiant d'enginyeria industrial, que es considera becari per estimar els seus costos, una sotsdirectora i un director de projecte.

Les hores s'han estimat a partir del registre produït durant el projecte i que es pot observar al Planning, taula 15.1.

Taula 19.1 Cost de les tasques

Tasca	Persona	Hores	Cost per hora [€/h]	Cost total
Recerca	Becari	41.50	6	249.00 €
Tutorials		35.00	6	210.00 €
Estudi UDF		18.00	6	108.00 €
Mètode 1		15.00	6	90.00 €
Mètode 2		24.00	6	144.00 €
Mètode 3		24.00	6	144.00 €
Mètode 4		25.00	6	150.00 €
Mètode 5		15.00	6	90.00 €
Nou disseny		16.00	6	96.00 €
Mallat		17.00	6	102.00 €
Redactar		210.00	6	1,260.00 €
Reunions	Becari	28.00	6	168.00 €
	Director projecte	28.00	45	1,260.00 €
	Sotsdirectora projecte	28.00	40	1,120.00 €
TOTAL				5,191.00 €

A més a més s'ha tingut en compte el cost que ha suposat realitzar les simulacions a part, ja que un cop preparades es necessari una gran quantitat de temps i s'ha de tenir en compte de cara al càlcul del cost del projecte.

I per acabar s'han considerat les hores d'utilització de l'ordinador durant el projecte en les tasques.

Taula 19.2 Cost de les simulacions

Concepte	Hores	Cost per hora [€/h]	Cost total
Ordinador sales universitat	24.00	0.0525	1.26 €
Ordinador departament Mec. Fluids	406.00	0.0675	27.41 €
Altres usos ordinador	440.50	0.0375	16.52 €
TOTAL			45.18 €

El cost final del projecte ha estat de 5,236.18 €.